



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Título: Tomografia de Refração Sísmica e de Resistividade Elétrica aplicadas à estimativa e caracterização de volumes de sedimentos contaminados por metais pesados. O caso do Córrego Consciência

OSÓRIO BELITO MANUEL DE CAVACUNDO

Orientador: Prof. Doutor José Fernando Borges

Coorientador: Prof. Doutor Bento António Caldeira

Mestrado em Ciência e Tecnologia da Terra, da Atmosfera e do Espaço

Especialidade de Geofísica Interna

Dissertação de Mestrado

Évora, 2015



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Título: Tomografia de Refração Sísmica e de Resistividade Elétrica aplicadas à estimativa e caracterização de volumes de sedimentos contaminados por metais pesados. O caso do Córrego Consciência

OSÓRIO BELITO MANUEL DE CAVACUNDO

Orientador: Prof. Doutor José Fernando Borges

Coorientador: Prof. Doutor Bento António Caldeira

Mestrado em Ciência e Tecnologia da Terra, da Atmosfera e do Espaço

Especialidade de Geofísica Interna

Dissertação de Mestrado

Évora, 2015

À minha mãe Permida Siliveli (em memória) e meu pai José Cavacundo

Resumo

Tomografia de Refração Sísmica e de Resistividade Elétrica aplicadas à estimativa e caracterização de volumes de sedimentos contaminados por metais pesados. O caso do Córrego Consciência.

Análises químicas feitas em amostras recolhidas na bacia do córrego Consciência revelaram elevados índices de contaminação de metais pesados, resultantes da ação industrial da fábrica de transformação mineira Votorantim Metais, situada nas margens do rio São Francisco no Estado brasileiro de Minas Gerais. Este facto levou à realização de uma campanha geofísica com vista a caracterizar e estimar o volume de sedimentos contaminados, recorrendo a tomografia de refração sísmica e de resistividade elétrica.

A aplicação da refração sísmica pode ser feita mediante diversas técnicas, de entre as quais a utilizada neste trabalho: a WET (Wavepath Eikonal Traveltime). É uma metodologia que difere dos métodos tradicionais, resolvendo a equação eikonal de propagação da onda sísmica ao longo do percurso da onda por retro-projeção (neste estudo considerou-se as ondas P). Os resultados levaram a concluir que a profundidade dos sedimentos potencialmente contaminados varia entre os 2.5 e 4 metros, o que permitiu calcular o volume pela regra 3/8 de Simpson.

A aplicação do método de resistividade elétrica pode ser feita por Sondagens Elétricas Verticais (SEV), Perfilagens, Sondagens 2-D e 3-D. Neste trabalho fez-se tomografia elétrica 2-D, invertendo os dados por minimização local com constrangimentos de suavização, o denominado “smoothness-constrained, least-squares method”. Os resultados permitiram concluir que a contaminação é pontual e dispersa, não tendo sido possível detetar plumas.

Abstract

Seismic Refraction and Electrical Resistivity Tomography applied to the volume estimate and characterization of sediments contaminated by heavy metals. The case of *Consciência Stream*.

Chemical analyses of samples taken in the basin of *Consciência Stream* revealed high levels of heavy metal contamination resulting from the industrial action of the mining processing plant *Votorantim Metais*, on the banks of the *São Francisco* River in the Brazilian State of *Minas Gerais*. Subsequently, a geophysical campaign was undertaken to characterize and estimate the volume of contaminated sediments, through seismic refraction and electrical resistivity tomography.

Among the several techniques used in the application of seismic refraction, WET (Wavepath Eikonal Traveltime) was adopted in this study. Its methodology differs from traditional ones, solving the eikonal equation of seismic wave propagation along the wave path by back-projection (in this study P waves were considered). The results obtained show that the depth of the potentially contaminated sediments varies between 2.5 and 4 meters, which allowed to calculate the volume by means of the Simpson's 3/8 Rule.

The application of the electrical resistivity method can be carried out by Vertical Electric Soundings (VES), Profiling, 2-D and 3-D Surveys. The electrical tomography 2-D was used in this study, inverting the data by means of the so-called smoothness-constrained, least-squares method. The results showed that the contamination is dispersedly located at some points; it was not possible to detect plumes.

Agradecimentos

A Deus pela graça, misericórdia e cuidado. À minha esposa Evalina de Cavacundo e filho Áquila de Cavacundo pela compreensão durante a minha ausência. Ao meu pai e meus irmãos pelo apoio moral e em certos casos, material. A todos os professores do Departamento de Física, particularmente os professores José Fernando Borges e Bento Caldeira pelo acompanhamento. Ao meu amigo Samuel Neves pela ajuda na utilização do Rayfract. Aos professores Alexandre Araújo e Rita Fonseca pelos seus contributos na caracterização geoquímica da área de estudo. A Ana Catarina por fornecer os resultados das análises químicas. Ao meu colega Eduardo Eliseu pelo companheirismo durante o curso de mestrado.

A todos o meu Muito Obrigado.

Índice

<i>Resumo</i>	VII
<i>Abstract</i>	XI
<i>Agradecimentos</i>	XV
<i>1. Introdução</i>	3
<i>1.1 Metodologia</i>	4
<i>1.2 Estrutura do Trabalho</i>	4
<i>2. Enquadramento teórico</i>	9
<i>2.1 Problema direto e inverso</i>	12
<i>2.1.1 Formulação do problema inverso</i>	13
<i>2.2 Tomografia de refração sísmica</i>	14
<i>2.2.1 Introdução</i>	14
<i>2.2.2 Tomografia WET</i>	15
<i>2.2.3 Aplicação da WET a modelos sintéticos</i>	20
<i>2.3 Tomografia de resistividade elétrica</i>	27
<i>2.3.1 Introdução</i>	27
<i>2.3.2 A Física de base</i>	28
<i>2.3.3 Inversão</i>	32
<i>2.3.4 Algumas características das configurações</i>	34
<i>2.3.5 Erros nas medições e/ou na inversão</i>	35
<i>3 O caso do córrego Consciência</i>	39
<i>3.1 Enquadramento da região em estudo</i>	39
<i>3.1.1 Localização geográfica</i>	39
<i>3.1.2 Topografia e Geoquímica</i>	39
<i>3.2 Tomografia sísmica aplicada ao caso concreto</i>	43
<i>3.2.1 Aquisição dos dados</i>	43
<i>3.2.2 Processamento</i>	44

3.2.3	<i>Resultados e discussão</i>	46
3.2.4	<i>Conclusão da análise dos resultados da tomografia sísmica</i>	52
3.3	<i>Tomografia elétrica aplicada ao caso concreto</i>	54
3.3.1	<i>Aquisição dos dados</i>	54
3.3.2	<i>Sequência das medições</i>	56
3.3.3	<i>Processamento.....</i>	56
3.3.4	<i>Resultados e discussão</i>	59
3.3.5	<i>Conclusão da análise dos resultados da tomografia elétrica</i>	66
4	<i>Estimativa do Volume.....</i>	71
4.1	<i>Procedimento</i>	71
4.2	<i>Volume e Incerteza relativa</i>	76
4.3	<i>Conclusão</i>	78
5	<i>Conclusões Gerais.....</i>	83
6.	<i>REFERÊNCIAS.....</i>	89
7.	<i>ANEXOS.....</i>	97
	<i>Anexo 1 Resultados das análises químicas.....</i>	97
	<i>Anexo 2 Construção do modelo sintético e consequente processamento.....</i>	102
	<i>Anexo 3 - Modelos iniciais, tomogramas e cobertura de raios dos perfis sísmicos. 113</i>	

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Problema direto/inverso.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.2a. Refração crítica.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.3. Modelos sintéticos 1 e 2.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.4 Modelos sintéticos 3 e 4.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.5. Distribuição da corrente elétrica num semi-espaço homogêneo</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.6. Esquema de injeção de corrente e medição do potencial.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.7. Configurações habitualmente empregues e respetivos fatores geométricos.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.1 Localização do estado brasileiro de Minas Gerais, da cidade de Três Marias, da Votorantim Metais e do córrego Consciência (linha azul). As linhas vermelhas tracejadas marcam uma estrada batida construída em 2010 (mais considerações a respeito desta estrada são dadas no ponto 3.1.2).</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.2 Modelo digital com as cotas em metros.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.3 Cerca enterrada pelo assoreamento no setor B.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.4 Equipamento e esquema de um perfil sísmico</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.5 Localização dos perfis sísmicos</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.6 Secção sísmica e gráfico tempo-distância para o 8º tiro do 8º perfil.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.7. Comparação das velocidades das ondas P obtidas no perfil 6 com a estratigrafia da sanja.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.8. 6º Perfil sísmico</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.9. 1º Perfil sísmico</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.10. 2º Perfil sísmico</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.11. 3º Perfil sísmico</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.12. 4º Perfil sísmico.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.13. 5º Perfil sísmico</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.14. 7º Perfil sísmico.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.15. 8º Perfil sísmico.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.16. Localização da área em que se sugere a realização de uma nova campanha geofísica</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.17 Equipamento para o método elétrico.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.18 Distribuição dos perfis de Elétrica</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.19 Eliminação dos pontos anómalos.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.20. Perfil 1 de tomografia elétrica.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.21. Perfil 2 de tomografia elétrica.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.22. Perfil 3 de tomografia elétrica.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.23. Perfil 4 de tomografia elétrica.....</i>	<i>63</i>

<i>Figura 3.24. Perfil 5 de tomografia elétrica.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3.25. Perfil 6 de tomografia elétrica.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.26. Perfil 7 de tomografia elétrica.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.27. Perfil 8 de tomografia elétrica.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.1 Superfícies consideradas para a estimativa do volume do setor A.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.2. Superfícies consideradas para a estimativa do volume do setor B.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.3. Superfícies consideradas para a estimativa do volume da área C.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.4 Cortes nas superfícies do setor A.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.5. Cortes nas superfícies do setor B.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.6. Cortes nas superfícies do setor B.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 7.2. Mapa de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para profundidades entre 0.2-0.4 metros.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 7.3. Mapa de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para profundidades entre 0.4-0.6 metros.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 7.4. Pontos de amostragem geoquímica.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 7. 6. Informação inicial dos tiros para um modelo sintético</i>	<i>103</i>
<i>Figura 7.7. Informação no Rayfract do ficheiro com a informação inicial do perfil do modelo sintético</i>	<i>104</i>
<i>Figura 7.8. Criação de uma malha regular no Surfer12</i>	<i>105</i>
<i>Figura 7.9. Criação do ficheiro bln para os contornos do modelo sintético.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 7.10. Criação do modelo sintético</i>	<i>106</i>
<i>Figura 7.11. Modelo sintético em degrau com descida suave no Surfer12</i>	<i>107</i>
<i>Figura 7.12. Modelo inicial 1D-Gradient Smooth para o modelo sintético 2.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 7.13. Parâmetros da interação na inversão WET.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 7.14. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 1</i>	<i>110</i>
<i>Figura 7.2. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 2.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 7.16. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 3.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 7.17. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 4.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 7.18. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do Perfil 1</i>	<i>113</i>
<i>Figura 7.19. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 1 de sísmica</i>	<i>114</i>
<i>Figura 7.20. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 3 de sísmica</i>	<i>115</i>
<i>Figura 7.21. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 4 de sísmica</i>	<i>116</i>
<i>Figura 7.22. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 5 de sísmica</i>	<i>117</i>
<i>Figura 7.23. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 6 de sísmica</i>	<i>118</i>
<i>Figura 7.24. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 7 de sísmica</i>	<i>119</i>
<i>Figura 7.25. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 8 de sísmica</i>	<i>120</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 Métodos geofísicos e suas aplicações (Reynolds, 1997).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.2 Velocidade das ondas P para diferentes meios.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2.3. Comparação dos métodos convencionais com a tomografia.</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 2.4. Resistividade elétrica de alguns materiais geológicos.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 2.5 Algumas características das principais configurações.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 3.1 Dados dos perfis sísmicos realizados.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 3.2. Características e parâmetros dos perfis de elétrica</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 3.3 Valores médios de resistividade</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 4.1 Volume de sedimentos estimado para cada setor.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 7.1. Concentrações dos metais poluentes.....</i>	<i>101</i>

1-INTRODUÇÃO

1. Introdução

Nos últimos anos a sociedade humana tem vindo a dar conta que as suas ações antropogénicas têm causado danos ao planeta, pelo que, de diversas formas, se têm feito estudos ambientais no sentido de avaliar a magnitude desses danos. A Geofísica, sendo geociência, não se abstém desses estudos. Por isso, a sua aplicação a estudos ambientais tem sido notória (Reynolds, 1997; Powers and Burton, 2007; Soupios et al., 2006; Metwaly et al., 2012; Elis et al., 2008; Fontoura et al., 2011) e é neste âmbito que se enquadra este trabalho. O seu objeto de estudo é a bacia sedimentar do córrego Consciência, junto a sua foz no rio São Francisco, na cidade de Três Marias, no Estado de Minas Gerais, Brasil. Estudos geoquímicos nesta região revelaram níveis críticos de contaminação em metais pesados resultante da atividade industrial da Empresa Votorantim Metais vocacionada, entre outras atividades, à transformação de zinco.

O objetivo geral do trabalho é o de estimar o volume de sedimentos contaminados por metais pesados e caracterizar a sua distribuição espacial, informação fundamental para a tomada de decisão das medidas de remediação a adotar e avaliação da dimensão e custos dessas medidas. Para alcançar tal objetivo recorreu-se aos seguintes métodos geofísicos:

1. Tomografia de refração sísmica, cujo objetivo é determinar a espessura dos sedimentos na região da planície aluvionar localizada na bacia do córrego Consciência, para a estimativa do volume de sedimentos contaminados.
2. Tomografia de resistividade elétrica, cujo objetivo é caracterizar a distribuição espacial da resistividade elétrica que pode estar relacionada com a distribuição da contaminação ao longo da bacia do córrego Consciência.

Foram então realizados 8 perfis de refração sísmica e de resistividade elétrica. Para o processamento dos dados da refração foi utilizada a técnica WET (**W**avepath **E**ikonal **T**raveltime), incorporado no *software* Rayfract da Intelligent Resources Inc.. Na tomografia de resistividade elétrica foi usada a configuração dipolo-dipolo e a inversão dos dados foi feita com base ao algoritmo de Loke, incorporada no *software* RES2DINVver. 3.59 da Geotomo Software.

A validação dos modelos de velocidade obtidos na tomografia de refração sísmica foi feita mediante a análise estratigráfica do material geológico extraído de uma sanja aberta junto a um dos perfis (Perfil 6). Tal sanja não serviu para validar os

modelos de resistividade elétrica por não se ter feito um estudo do comportamento elétrico do material dali extraído. Além disso, o perfil elétrico feito junto a ela apresenta erros com valores muito elevados. Apesar disso, pode-se dizer que a tomografia de resistividade elétrica (até certo ponto) permitiu caracterizar a contaminação.

1.1 Metodologia

Para o alcance do objetivo geral procedeu-se da seguinte forma:

- Seleção dos métodos e técnicas a usar;
- Realização da campanha de recolha de dados no Brasil (Agosto e Setembro de 2014);
- Processamento e análise dos dados para os dois métodos;
- Estimativa do volume de sedimentos potencialmente contaminados;
- Interpretação de resultados

Com base no objetivo a alcançar e nas características da região (conhecidas graças aos estudos geoquímicos prévios) houve a necessidade de escolher os métodos mais adequados. Esta escolha baseou-se essencialmente na revisão da literatura sobre os métodos geofísicos aplicados a diferentes problemas ambientais. Reynolds (1997) e Sharma (1997) apresentam abordagens sobre os principais métodos geofísicos e suas aplicações, onde destacam os métodos sísmicos (reflexão e refração) como apropriados para a determinação de estruturas subsuperficiais e o método de resistividade elétrica como sendo o mais apropriado para monitorar contaminações.

Uma vez conhecida a profundidade dos sedimentos é possível estimar o seu volume. Neste trabalho calculou-se o volume numericamente pela regra de 3/8 de Simpson incorporada no *software* Surfer 12 da Golden Software.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho apresenta a seguinte estrutura:

Capítulo I: Introdução. Faz-se o enquadramento do trabalho, definição dos objetivos e técnicas usadas.

Capítulo II: Enquadramento teórico: divide-se em três partes:

1. Introdução geral: Aqui define-se a Geofísica, classifica-se os métodos geofísicos e aborda-se de forma genérica o problema direto e inverso.
2. Tomografia sísmica: enquadra-se a tomografia dentro das técnicas comumente usadas na sísmica de refração. Em seguida apresenta-se de forma geral em que consiste a técnica WET e faz-se sua aplicação em modelos sintéticos.
3. Tomografia elétrica: aborda-se a teoria, bem como o método de inversão.

Capítulo III: O caso do córrego Consciência. Este capítulo divide-se em três partes:

1. Na primeira parte faz-se o enquadramento da região em estudo, especificamente a localização geográfica e a caracterização geoquímica.
2. Na segunda parte do capítulo faz-se a aplicação da técnica WET ao caso concreto do córrego Consciência. Começa-se por apresentar o equipamento usado e depois os resultados e a discussão em torno destes.
3. Na terceira parte faz-se a aplicação da tomografia de resistividade elétrica ao caso do córrego Consciência.

Capítulo IV: É neste capítulo que é feita a estimativa do volume de sedimentos.

Capítulo V: Conclusão geral. Neste capítulo procura-se estabelecer as relações possíveis entre os resultados dos diferentes métodos, assim como relaciona-los com os resultados da geoquímica.

Finalmente apresenta-se as referências bibliográficas e os anexos.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2. Enquadramento teórico

A formação das rochas que constituem a Terra ocorreu através de processos físicos, químicos e biológicos que acompanham a dinâmica da Terra desde o seu aparecimento. Por exemplo, a formação de rochas metamórficas só acontece mediante a presença de forças muito elevadas (processo físico), mas sua composição forma-se por meio de processos químicos. A formação e maturação de hidrocarbonetos deu-se por processos físicos e biológicos (Mussett and Khan, 2000). São os modelos físicos da matéria associados à tecnologia que possibilitam a obtenção de informações da localização, composição e estrutura das rochas medindo certas propriedades físicas à superfície. É nesta ideia em que se baseia a Geofísica. Como o próprio nome indica, a Geofísica é a ciência que usa a Física para o estudo da Terra. Lida com todos os aspetos da Física da Terra sólida e sua atmosfera. Por ser um planeta o objeto de estudo, ela também se pode estender a outros planetas e consequentemente ser relacionada com a Astronomia, ou seja, são usados princípios geofísicos no estudo de planetas e outros corpos celestes (Telford et al., 1990). A parte da Geofísica que estuda o interior da Terra é a Geofísica Interna, que costuma ser dividida em: Geofísica Global e Geofísica Aplicada (Telford et al., 1990; Reynolds, 1997). A Geofísica Global estuda o planeta como um todo para investigar sua estrutura e características interna. A Geofísica Aplicada é a parte que estuda a zona mais superficial do planeta (a crosta), com fins económicos, ambientais, exploração de água, aplicada a Geotecnia e Engenharia Civil, Arqueologia, Ciências Forenses, Agricultura, Fitotecnia, etc. Devido a multiplicidade de aplicações, nos últimos anos têm surgido várias subdisciplinas da Geofísica Aplicada, tais como Geofísica Ambiental (Geofísica aplicada a estudos ambientais), Arqueo-Geofísica (Geofísica para Arqueologia), Hidro-Geofísica (Geofísica para a Hidrogeologia), Glacio-Geofísica (Geofísica aplicada a ambientes glaciares), etc. (Reynolds, 1997).

Os métodos usados na Geofísica Aplicada são desenvolvidos por formas a responderem às propriedades físicas dos diferentes meios subterrâneos (água, rochas, sedimentos, etc.) e podem ser classificados em dois tipos (Reynolds, 1997):

- Métodos Passivos: aqueles que detetam as variações nos campos naturais associados a Terra (Gravitacional e Magnético)

- **Métodos Ativos:** consistem em introduzir estímulos artificiais na terra que são depois detetados por dispositivos apropriados, e “transportam” informações do meio por onde passam. Entre estes destacam-se os métodos sísmicos, o método de resistividade elétrica e eletromagnéticos.

Quando se usa um método de geofísica o objetivo é encontrar contrastes de certa propriedade física no meio. Por isso os métodos são limitados à existência desses contrastes e à capacidade de os medir. Se o contraste da propriedade que se mede não existir no meio que se estuda, por o meio ser homogêneo em relação a essa propriedade, o método não resulta. Se o contraste existir mas o equipamento usado não tiver sensibilidade suficiente para o detetar, aí também o método não resulta. Outra limitação diz respeito à incapacidade dos métodos físico-matemáticos desenvolvidos tratarem os dados recolhidos. Nessa categoria temos a conhecida não unicidade das soluções, ou seja, diferentes estruturas subterrâneas podem responder de igual forma à superfície (Reynolds, 1997; Burger et al., 2006). Esta última limitação impõe que o modelo resultante de uma exploração geofísica deva ser geologicamente validado. Finalmente, outra limitação que afeta os dados, e consequentemente os resultados, é o ruído, que poderá ter origem natural ou antrópica. Os métodos elétricos e eletromagnéticos são afetados por correntes elétricas ou sinais alheios à pesquisa. Os métodos de sísmica podem ser afetados por ruídos gerados pela atividade humana ou por fenómenos naturais. O próprio equipamento em si é uma fonte geradora de ruído.

A propriedade física medida por um método determina o fim para o qual o método é usado. Reynolds (1997) e Sharma (1997) apresentam abordagens detalhadas sobre este aspeto. Na tabela 2.1 mostra-se os principais métodos geofísicos, as propriedades física medida e suas principais aplicações (adaptada de Reynolds, 1997).

Método Geofísico	Propriedade física	Principais aplicações									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravimétrico	Densidade	p	p	s	s	s	s	i	i	s	i
Magnético	Susceptibilidade	p	p	p	s	i	u	i	p	P	i
Refração sísmica	Módulo de elasticidade/densidade	p	p	u	p	s	s	i	i	i	i

Reflexão sísmica	Módulo de elasticidade/densidade	p	p	u	s	s	u	i	i	i	i
Resistividade	Resistividade	u	u	p	p	p	p	p	d	p	u
Potencial espontâneo	Diferença do potencial	i	i	p	u	p	u	u	u	i	i
Polarização induzida	Resistividade/capacitância	u	u	p	u	s	u	u	u	u	u
EM*	Condutância/indutância	s	p	p	p	p	p	p	p	p	u
EM-VLF**	Condutância/indutância	u	u	p	u	s	s	s	u	u	i
EM-GPR***	Permissividade/condutância	i	i	u	p	p	p	s	p	p	p
Magneto-telúrico	Resistividade	s	p	p	u	u	i	i	i	i	i

Tabela 2.1 Métodos geofísicos e suas aplicações (Reynolds, 1997)

p=primário, s=secundário, u=pode ser usado, mas não garante os melhores resultados, i=inadequado.

- 1-Exploração de hidrocarbonetos;
- 2-Estudos geológicos;
- 3-Exploração de depósitos de minérios;
- 4-Investigações para a engenharia (exemplo geotecnia);
- 5-Hidrogeologia;
- 6-Detecção de cavidades subsuperficiais;
- 7-Characterização de plumas de contaminação;
- 8-Localização de objetos metálicos;
- 9-Arqueo-Geofísica;
- 10-Estudos Forenses.

(*) Eletromagnético; (**) Very Low Frequency; (***) Ground Penetrating Radar.

Nesta tabela pode-se ver por exemplo, que a refração sísmica permite determinar a densidade e o módulo de elasticidade do meio e, portanto, é adequado quando o objetivo é caracterizar a estrutura geológica de uma região, mas inadequado para caracterizar plumas de contaminação. Já o método de resistividade elétrica, mesmo não garantindo os melhores resultados, pode ser usado para determinar estruturas geológicas, mas é mais adequado para caracterizar plumas de contaminação (Reynolds, 1997). Por isso, neste trabalho usou-se estes dois métodos, o primeiro para determinar a profundidade dos sedimentos e o segundo para caracterizar a distribuição espacial da resistividade elétrica que pode indicar contaminações por metais pesados.

2.1 Problema direto e inverso

Dado um certo modelo que representa uma estrutura subsuperficial, calcular os efeitos que essa estrutura produziria à superfície, sensíveis a medição por um instrumento geofísico (observações), é o chamado **problema direto**. Na prática não se conhece previamente qualquer modelo, mas as medições feitas à superfície a partir das quais há que calcular a estrutura que as produz, ou seja, a partir dos efeitos (observações) e usando as leis físicas e relações matemáticas associadas ao problema em questão, é possível determinar a estrutura (modelo) responsável pelos efeitos. A este processo de cálculo chama-se **Problema inverso** (figura 2.1).

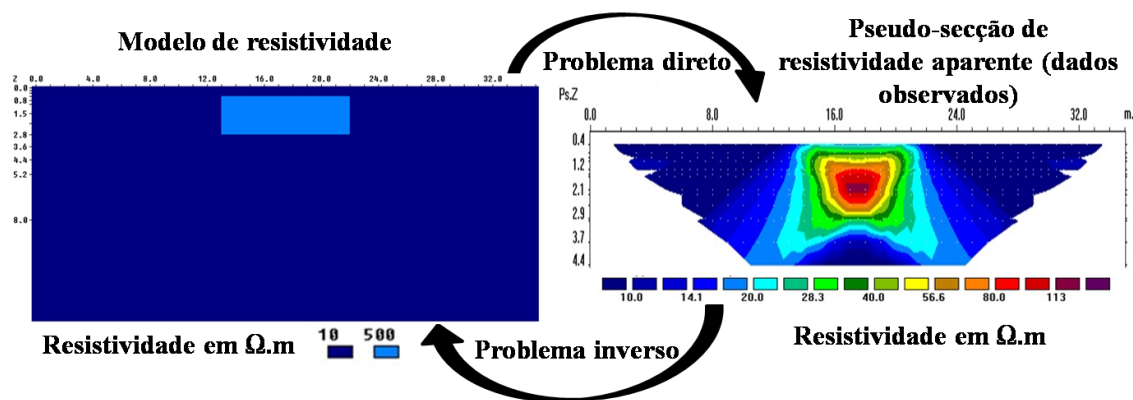


Figura 2.1 Problema direto/inverso

Representação esquemática do problema direto (do modelo às observações) e inverso (das observações ao modelo) para a resistividade elétrica. Adaptado de Loke (2001).

O problema inverso pode não ter solução única. Por exemplo, em gravimetria uma anomalia de gravidade é causada por uma massa anómala. A massa anómala depende da diferença de densidades entre o meio e o corpo contrastante e também do seu volume. Consequentemente, diferentes corpos poderão produzir a mesma anomalia, ou na perspetiva do problema inverso, existe uma infinidade de modelos que satisfazem a mesma anomalia observada a superfície. Trata-se portanto, de um problema de não unicidade da solução do problema inverso, típica dos métodos potenciais, mas também presente em outros métodos, nomeadamente os métodos resistivos e sísmicos. Para minimizar este problema, na solução do problema inverso é comum a introdução de informações *a priori* e/ou *a posteriori* que permitem restringir a família de modelos possíveis.

2.1.1 Formulação do problema inverso

Seja $f=f_1, f_2, \dots, f_m$ um vetor contendo os valores medidos (ou observados), por relações físico-matemáticas aplicadas a um modelo é possível determinar-se o vetor $p=p_1, p_2, \dots, p_m$, dos valores esperados correspondentes a f , os valores teóricos (problema direto). O problema inverso consiste em determinar os parâmetros do modelo “ q ” cuja resposta é “ p ”. Assim, o objetivo da inversão é encontrar os valores de “ q ” que permitam minimizar a diferença entre f e p . Para tal define-se uma função erro “ g ”, tal que p tende para f quando g tende para zero. A qualidade da inversão é dada pelo desvio médio quadrático (RMS), que pode se expresso de formas diferentes dependendo da normalização que se pretende. Mas de forma geral é dado por:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(p-f)^2}{N}} \times 100\% \quad \text{Eq. 2.1}$$

Quanto menor for o RMS melhor é o ajuste entre o modelo observado e o modelo teórico.

A relação entre os parâmetros do modelo q e os dados teóricos p na sua forma mais simples é dada por (Costa et al., 2013):

$$\begin{aligned} p &= Gq \text{ (problema direto)} \\ q &= G^{-1}p \text{ (problema inverso)} \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Em que G é uma matriz generalizada de dimensão $N \times M$, sendo N o número de medições e M o número de parâmetros do modelo, que representa as equações que aplicadas aos parâmetros do modelo dão os dados teóricos e G^{-1} é a sua inversa.

Os problemas inversos podem ser lineares ou não lineares dependendo da forma como q e p se relacionam. Em Geofísica é mais frequente encontrar problemas não lineares, pelo que o processo de solução deve ser iterativo. Existem vários métodos de solução desde os baseados em minimização local, tais como os métodos de Tikhonov, Gradiente Descendente, Newton, Gradiente Conjugado, aos baseados em minimização global, tais como o Simulated Annealing e o método de Procura Aleatória Controlada (Costa et al., 2013).

Os parâmetros do modelo devem ser tais que:

- A resposta do modelo deve ser compatível com os dados observados;
- Deve ser possível determinar os limites de validade do modelo calculado;

- O modelo calculado deve ter significado geológico. Isto resulta da não unicidade de soluções.

2.2 Tomografia de refração sísmica

2.2.1 Introdução

A refração sísmica é um método que permite determinar estruturas subsuperficiais através do cálculo das velocidades de propagação das ondas sísmicas em função da profundidade, a partir de medidas dos tempos das primeiras chegadas destas ondas. Tratando-se de um método ativo, é necessário recorrer a uma fonte sísmica capaz de gerar uma onda sísmica que, após sofrer os efeitos de propagação no meio, é captada por geofones que se encontram distribuídos segundo geometrias definidas. A onda sísmica propaga-se em todas as direções e, ao atravessar as interfaces entre meios com características diferentes, sofre efeitos semelhantes aos observados na ótica, sendo a refração um deles. A velocidade varia de acordo com as características elásticas do meio e estas são definidas pelas constantes elásticas, nomeadamente, módulo de Young, módulo de elasticidade volumétrica, razão de Poisson, módulo de rigidez (Telford et al., 1990; Reynolds, 1997). A tabela 2.2 apresenta os valores típicos da velocidade das ondas P em diferentes materiais. Existem vários métodos de interpretação, desde os clássicos (distância crítica, tempo de interceção, tempo de atraso, plus-minus, GRM etc.) à tomografia WET (**W**avepath **E**ikonal **T**raveltime).

Material	V _p (m/s)		Material	V _p (m/s)
Ar	330		Arenito	1400-4500
Água	1450-1530		Calcário macio	1700-4200
Neve	350-3000		Xisto	2000-4100
Areia seca	200-1000		Granito	4600-6200
Areia saturada	1500-2000		Basalto	5500-6500
Argila	1000-2500		Gabro	6400-7000
Aluviões*prof<1900m	≈500-2000		Mármore	3780-7000

Tabela 2.2 Velocidade das ondas P para diferentes meios

(*)- Redpath (1973). Todos os outros valores foram extraídos de Reynolds (1997).

Os métodos clássicos baseiam-se nas leis de Snell e princípios de Fermat e de Huygens. Para além disso fazem-se simplificações geométricas para calcular a velocidade das camadas e sua profundidade. Alonso and Finn (2000) e Serway and Jewett (2004) apresentam abordagens detalhadas sobre a lei e os princípios citados. A aplicação destes conceitos leva à obtenção de expressões que envolvem a espessura das camadas e tempos de percursos (Telford et al., 1990; Reynolds, 1997; Kearey et al., 2002; Burger et al., 2006).

Entretanto os métodos clássicos de refração sísmica não fornecem informações sobre descontinuidades e variações laterais de velocidade, bem como informações detalhadas de subestruturas. Estas informações podem ser conseguidas com recurso a tomografia de refração sísmica (Burton et al., 2010). A tomografia de refração sísmica tem-se revelado uma técnica muito poderosa quando aplicada à resolução de problemas ambientais (Powers and Burton, 2007; Gaines, 2011). Por esta razão, e tendo em conta que se pretende obter informações detalhadas sobre a subestrutura (incluindo variações laterais de velocidade), escolheu-se a tomografia de refração sísmica em detrimento dos métodos clássicos.

O Objetivo principal é determinar a profundidade dos sedimentos potencialmente contaminados como resultado da atividade industrial, no sentido de complementar a informação produzida pela caracterização geoquímica, avaliando o volume de sedimentos contaminados para suporte à tomada de medidas de reabilitação da região.

2.2.2 Tomografia WET

A tomografia sísmica difere dos métodos clássicos não só pela forma de aquisição dos dados mas principalmente pelas técnicas de interpretação dos mesmos. Enquanto os métodos clássicos são baseados em considerações geométricas e idealizações matemáticas de camadas refratoras, a tomografia, por exemplo a WET, parte de um modelo inicial de velocidade, resolve iterativamente a equação de onda para determinar os tempos teóricos e inverte os dados pela fórmula de retroprojeção. A tabela 2.3 apresenta uma comparação resumida entre os métodos clássicos e os tomográficos (Burton et al., 2010):

Métodos clássicos	Tomografia
Exemplos	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Método de reciprocidade generalizada (Generalized Reciprocal Method GRM) ➤ Método do tempo de atraso ➤ Método do tempo de interceção ➤ Método do Plus-minus 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Algoritmo do Raytracing ➤ Solução numérica da equação eikonal <ul style="list-style-type: none"> • WET • Generalized Simulated Annealing
Modelos de velocidades	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Camadas definidas por interfaces <ul style="list-style-type: none"> • Podem ser inclinadas ➤ Todas as camadas têm velocidade constante <ul style="list-style-type: none"> • As variações laterais podem ser obtidas dividindo as camadas por “blocos” finitos ➤ Número limitado de camadas ➤ A velocidade aumenta com a profundidade ➤ Geralmente exigem mais subjetividade 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ A interface entre as camadas não é claramente definida ➤ Variação lateral e vertical gradual <ul style="list-style-type: none"> • Pode ser difícil distinguir interfaces ou variações abruptas de velocidade ➤ Número de camadas ilimitado ➤ É possível observar inversões de velocidade ➤ Geralmente requer menos subjetividade

Tabela 2.3. Comparação dos métodos convencionais com a tomografia. (Burton et al., 2010).

Neste trabalho será abordada de forma resumida a WET (**W**avepath **E**ikonal **T**raveltime), baseada no algoritmo apresentado por Schuster e Bosz (1993), por ser aquele incorporado no *software* Rayfract (usado no presente trabalho para processar os dados). Schuster e Bosz propuseram o seguinte algoritmo de tomografia:

- Picagem dos tempos das primeiras chegadas a partir dos sismogramas (tempos observados);
- Cálculo dos tempos teóricos por resolução da equação eikonal pelo método das diferenças finitas, usando um modelo inicial de velocidades (Qin et al., 1992).
- Minimização de uma função custo pelo método do gradiente descendente, resultando na fórmula de retroprojeto (Schuster and Bosz, 1993, pp 1315 e 1317).
- Atualização do modelo inicial de velocidades e em seguida os passos anteriores são repetidos iterativamente até se atingir o critério de convergência (melhor ajuste

entre os tempos teóricos e observados, isto é minimização da diferença entre estes tempos). O melhor ajuste entre os tempos teóricos e observados é aquele para o qual o RMS é menor.

Sabendo a localização da fonte sísmica, medindo o tempo de chegada da onda em cada recetor e considerando um modelo inicial de velocidades (a priori), a retroprojeção permite resolver a equação eikonal ao longo da trajetória dos raios sísmicos, isto é, obter os tempos de chegada de forma inversa (partindo dos recetores à fonte). Existem vários métodos de obtenção dos modelos, tais como o Método de Reciprocidade Generalizada (**Generalized Reciprocal Method-GRM**) (Palmer, 1981), o método Plus-Minus (Hagedoorn, 1959), o método de tempo de interceção (Sheriff and Geldart, 1995) e o método Delta-V (Rohdewald, n.d.).

Atualmente calculam-se os modelos iniciais pelo método XTV constituído por três sub-métodos, de acordo ao algoritmo proposto por Winkelmann em 1998 (in Rohdewald, n.d.):

- 1) Por tempo de interceção quando se verifica variações bruscas da velocidade aparente entre pontos consecutivos, indicando refração crítica. No Rayfract, a razão máxima de velocidades entre camadas adjacentes pode ser automaticamente definida, ou escolhida pelo utilizador.
- 2) Por inversão Dix modificada, quando se verifica inversões de velocidade, isto é, quando a velocidade média e/ou a velocidade no topo de certa camada é inferior ao valor da velocidade na base da camada anterior a esta.
- 3) Por DeltaV, caso não se usem as opções anteriores. Este método funciona para quase todas as situações.

Em seguida faz-se uma breve abordagem de cada uma das três técnicas que compõem o método XTV.

2.2.2.1 Tempo de interceção

Considere-se uma onda mecânica que se propaga num meio constituído por uma camada com velocidade V_1 sobreposta a um meio homogéneo, isotrópico e semi-infinito com velocidade V_2 , cujo movimento é registado por geofones colocados à superfície,

conforme mostra a figura 2.2a. A onda direta propaga-se na superfície enquanto a onda que penetra no interior é refletida e refratada ao interagir com a interface que separa os dois meios com propriedades elásticas diferentes. Na figura 2.2 b estão representados os gráficos tempo-distância para a onda direta, refratada e refletida. Pode-se determinar as velocidades V_1 e V_2 através dos inversos dos declives das retas das ondas diretas e refratadas, respetivamente.



Figura 2.2a. Refração crítica

Modelo de duas camadas (uma camada sobre um meio isotrópico, homogêneo e semi-infinito), em que a $V_2 > V_1$, sendo i_c e Z o ângulo de incidência crítica e a espessura da primeira camada respetivamente (adaptado de Reynolds, 1997)

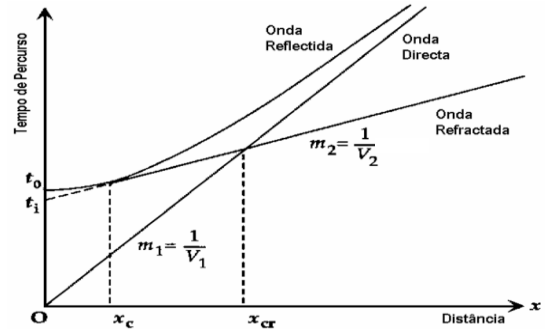


Figura 2.2b. Gráfico Tempo-Distância para as ondas direta, refratada e refletida.

Vê-se que a primeira onda a chegar é a onda direta para distâncias pequenas. A uma distância crítica (X_c) passa a ser a onda refratada a primeira a chegar. O inverso dos declives da reta da onda direta dá o valor da velocidade no meio 1 (V_1) e o inverso do declive da onda refratada dá a velocidade do meio 2 (V_2). (adaptado de Reynolds, 1997)

Nos geofones localizados próximos da fonte, a primeira onda a ser registada é a onda direta. A um certo ângulo de incidência (designado por ângulo de incidência crítica, i_c) passa a ocorrer refração crítica e haverá uma distância (distância de cruzamento x_{cr}), para a qual a onda direta e a onda refratada criticamente chegam simultaneamente. A partir dessa distância a primeira onda a ser registada é sempre a onda refratada criticamente na interface que separa os dois meios. De acordo com Reynolds (1997) a espessura H_1 da primeira camada relaciona-se com as velocidades V_1 e V_2 e a distância de cruzamento por:

$$H_1 = \frac{x_{cr}}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

O tempo de interceção t_i é obtido através da extrapolação dos valores dos tempos de chegada da onda criticamente refratada na origem. A partir de t_i e das velocidades V_1 e V_2 é também possível, estimar a espessura H_1 da primeira camada:

$$H_1 = \frac{T_i V_1 V_2}{2\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad \text{Eq. 2.4}$$

Redpath (1973) apresenta uma abordagem mais detalhada do tempo de interceção para um modelo de múltiplas camadas.

2.2.2.2 Inversão Dix Modificada

O método de inversão Dix modificado assume reflexão dos raios. Apesar de ter em conta as fases refletidas é usado na refração porque em certos casos as primeiras chegadas devem-se a difração (Gaines 2011). A profundidade é determinada por (Rohdewald, n.d.):

$$H_1 = \frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{V_t}{\Delta} - 1} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Em que Δ é a distância entre a fonte e o recetor (no ponto onde se calcula a profundidade da camada); t é o tempo de percurso da onda entre a fonte e o recetor, separados pela distância Δ ; V é a velocidade na base de cada camada.

A velocidade média na base da camada é obtida por (Rohdewald, n.d.):

$$v = \sqrt{\frac{V\Delta}{t}} \quad \text{Eq. 2.6}$$

2.2.2.3 Delta-V

Este método foi descrito pela primeira vez por Helmut Gebrande (in Rohdewald, n.d.). Contrariamente aos métodos clássicos, o Delta-V dispensa a otimização matemática de camadas refratoras. É considerado que a subsuperfície é constituída por camadas sobrepostas, no interior das quais o gradiente vertical de velocidade é constante. Considerando que não existem variações verticais bruscas de velocidade, a velocidade na base da camada é determinada por regressão linear ao longo de pontos (Δ, t) , em que Δ são os pontos médios comuns (ou CMP da sigla em inglês) (Rohdewald, n.d.):

$$v(z) = az + v_0 \quad \text{Eq. 2.7}$$

Em que $v(z)$ é a velocidade no interior de uma subcamada, a é a taxa de variação da velocidade, z é a profundidade e v_0 a velocidade no topo da subcamada, cujo valor é dado por resolução numérica da equação (Rohdewald, n.d.):

$$f(v_0) = \frac{t\sqrt{V-v_0}}{\Delta} - \operatorname{arccosh}\left(\frac{V}{v_0}\right) = 0 \quad \text{Eq. 2.8}$$

Um gradiente constante implica que os raios seguem uma trajetória circular entre os pontos de tiro e os recetores dados pelas expressões (Rohdewald, n.d.):

$$\Delta(V) = \frac{2}{a} \sqrt{V^2 - v_0^2} \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$t(V) = \frac{2}{a} \operatorname{arch}\left(\frac{V}{v_0}\right) \quad \text{Eq. 2.10}$$

Em que $\Delta(V)$ é o trajeto dos raios e $t(V)$ o tempo de percurso em cada subcamada.

A espessura de cada subcamada é dada por (Rohdewald, n.d.):

$$h = \frac{\Delta}{2} \sqrt{\frac{V-v_0}{V+v_0}} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Como resultado deste processo gera-se um modelo 2D da velocidade em função da profundidade, a que se chama Pseudo-2D DeltaV. Para suavizar, estende-se lateralmente o modelo até no fim do perfil através do cálculo das velocidades médias entre pontos consecutivos. O resultado é um modelo de velocidades que varia apenas com a profundidade e não com a distância horizontal, a que se chama 1D-Gradient Smooth Initial Model.

Os métodos tradicionais assumem camadas cuja velocidade não varia lateralmente e com um número de camadas relativamente reduzido (3 a 5), ao contrário do método Delta-V que admite variações laterais de velocidade e pode modelar entre 10 a 20 camadas sob cada CMP (dependendo do espaçamento entre os tiros e entre as estações e do comprimento do perfil) (Rohdewald, n.d.).

2.2.3 Aplicação da WET a modelos sintéticos

2.2.3.1 Introdução

Como referido anteriormente, para o processamento dos dados foi usado o *software* Rayfract que faz a inversão do modelo de velocidade conforme descrito no parágrafo 2.2. Uma forma de controlar os parâmetros a utilizar na inversão é aplicar este método a modelos sintéticos. Em <http://rayfract.com/> existem vários testes que mostram os

resultados de inversão para diversas situações e são dadas sugestões de como melhorar os modelos de velocidade controlando vários parâmetros.

Neste trabalho foram feitos testes usando quatro modelos sintéticos com ligeira diferença entre si, cuja geometria de aquisição é semelhante à dos perfis sísmicos realizados na planície junto ao córrego Consciência. O objetivo foi o de avaliar a resposta do programa a situações tais como:

- Transição de baixas para altas velocidades;
- Variações bruscas e suaves na geometria do modelo;

Em primeiro lugar deve ser feita a escolha do modelo inicial a usar. O Rayfract dispõe essencialmente de dois métodos para criar os modelos iniciais a partir dos quais faz a inversão iterativa: DeltaV e 1D-Gradient smooth initial model (obtido com a horizontalização da média da velocidade a partir do Pseudo-2D DeltaV). Por recomendação da Intelligent Resources Inc. A utilização do Delta-V deve ser precedida pela utilização do 1D-Gradient smooth initial model, uma vez que o DeltaV pode gerar artefactos no modelo de velocidade (Rohdewald, 2004, Palmer, 2006). Nos seis primeiros *sites* da referência bibliográfica encontram-se vários exemplos apresentados pela Intelligent Resources Inc. mostrando que o 1D-Gradient smooth initial model apresenta vantagens em relação ao DeltaV e que para a maior parte dos casos dá bons resultados. Por esta razão este foi o método escolhido para obter o modelo inicial na análise das situações sintéticas. Apesar disso, sabe-se que o DeltaV responde melhor a situações geológicas em que há inversões de velocidade (Rohdewald, 2004).

Uma vez escolhido o modelo inicial, constrói-se os modelos sintéticos através do programa Surfer 11. Em seguida importa-se o modelo para o Rayfract de modo a obter o modelo inicial e a subsequente inversão WET.

2.2.3.2 Criação do perfil no Rayfract 3.31

O perfil sísmico foi feito com base na geometria dos perfis sísmicos reais. Foram considerados 48 geofones espaçados em 0.5 metros e 17 tiros com início aos -0.25 metros do primeiro geofone e espaçados de 1.5 metros (consultar anexo 2.1 para mais detalhes).

2.2.3.3 Construção dos modelos sintéticos e respetivas análises

Usando o *software* Surfer11 foram geradas malhas quadradas com espaçamento entre nós de 0.05 metros, 24 metros de comprimento e 10 metros de (profundidade). O comprimento foi escolhido com base no comprimento dos perfis realizados junto ao córrego Consciência (com 24 metros, em todos os casos). A ideia é assemelhar a geometria dos modelos sintéticos à dos perfis sísmicos reais.

Consideraram-se modelos sintéticos constituídos por duas camadas sobrepostas com velocidades constantes de valores 600m/s e 1800m/s, respetivamente. No anexo 2.2 mostram-se os passos seguidos para a construção das malhas. Os modelos assim gerados estão representados nas figuras 2.3 e 2.4.

Modelo 1 e 2

O modelo 1 é uma adaptação do modelo sintético feito por Manuela Mendes e Teresa Teixidó (Mendes and Teixidó, 2008), cuja descrição se encontra disponível em <http://rayfract.com/tutorials/step.pdf> e no qual foram introduzidas alterações das dimensões e geometria do perfil sísmico adequando-o aos perfis reais estudados neste trabalho. O modelo é constituído por duas camadas em degrau com desnível brusco entre os 2 e 4 metros de profundidade e localizado a 12 metros de distância em relação à origem (figura 2.3a topo).

O modelo 2 é uma variante do primeiro, apenas com uma suavização na descida do degrau (figura 2.3b topo).

Com este teste pretende-se avaliar como o método usado pelo Rayfract responde a variações bruscas ou suaves da estrutura subsuperficial e para qual destas situações o modelo obtido melhor se aproxima do modelo de partida.

Ao comparar os tomogramas representados pode-se ver claramente que o modelo sintético constituído por um degrau com descida suave é melhor resolvido em relação àquele com descida brusca, isto é, o tomograma da figura 2.3 b (com um RMS de 0.7%) é mais próximo do modelo sintético que o gerou do que o da figura 2.3a (com RMS de 0.8%). A proximidade aqui referida é do ponto de vista geométrico. Pode-se ver em 2.3b que a linha que marca a camada refratora sobrepõe com uma proximidade razoável a linha que marca a interface das camadas do modelo sintético (linha castanha). Esta constatação

também pode ser feita a partir das figuras de cobertura de raios em que se vê a região de maior definição (zona mais avermelhada) a acompanhar a interface das camadas do modelo sintético. Entretanto, o método falha na representação fiel da velocidade, ou seja, a transição de velocidades não é feita de forma brusca conforme acontece no modelo sintético, mas através de um gradiente. Isto acontece porque o método DeltaV (a partir do qual se obtém o 1D-Gradient smooth initial model) introduz um gradiente de velocidade mesmo quando este não existe na realidade. As curvas dos tempos de percurso, bem como os detalhes da construção da linha que marca a camada refratora encontram-se no anexo 2.3.

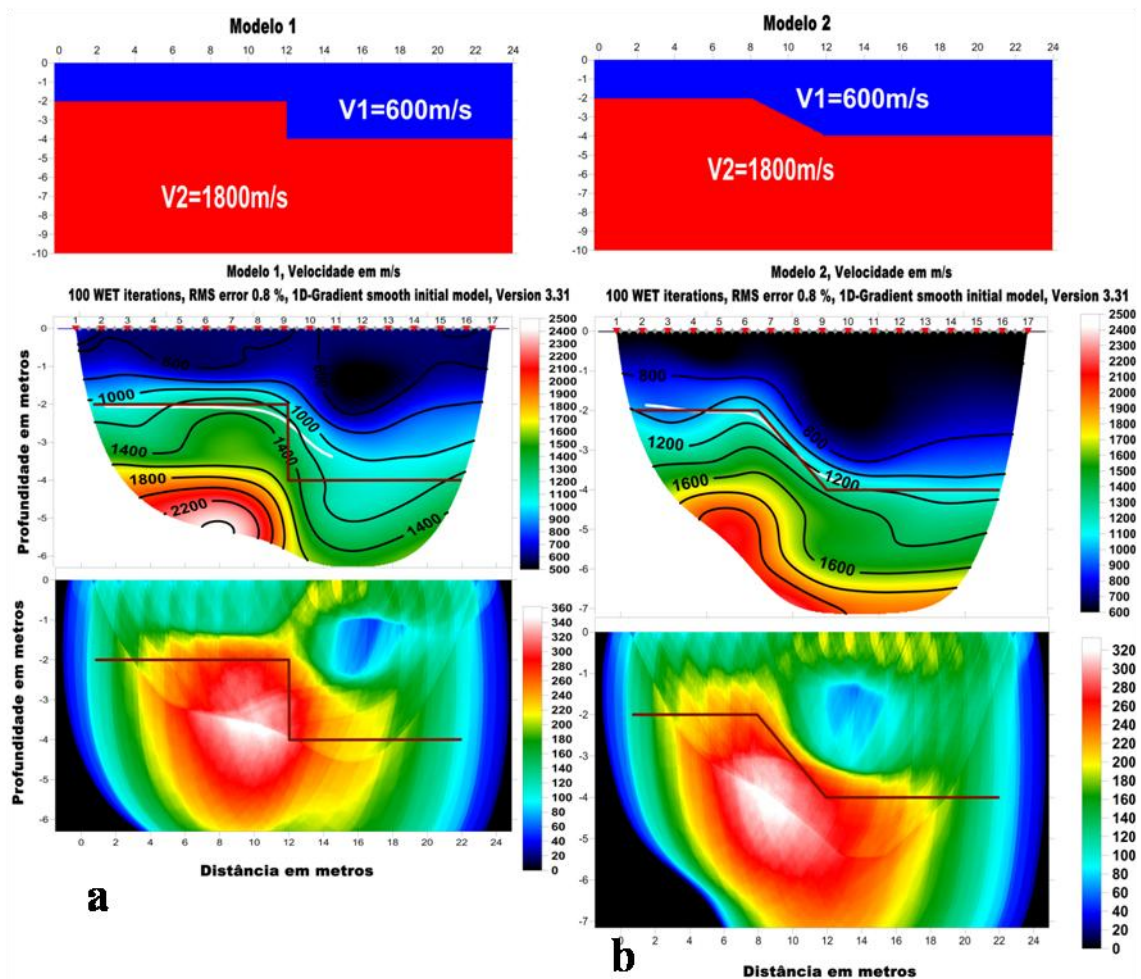


Figura 2.3. Modelos sintéticos 1 e 2.

Figuras do topo: Modelos em escada com descida brusca e suave (figuras a e b respectivamente). Figuras centrais: Modelo de velocidades obtido por inversão a através do Rayfract (tomograma). Em baixo: figura de cobertura de raios sísmicos gerados através do Rayfract. Nos tomogramas as linhas brancas marcam a posição da interface entre as camadas superior e inferior (para mais detalhes acerca da sua obtenção ver anexo 2). As linhas castanhas representam a interface das camadas no modelo sintético. Os triângulos invertidos marcam os pontos de tiro, os pontos cinzentos marcam a posição dos geofones e as linhas pretas são isolinhas de velocidades espaçadas em 200m/s.

Modelo 3 e 4

O modelo 3 apresenta dois degraus (um descendente e um ascendente) com descida e subida bruscas (em geologia equivale a um graben). E no modelo 4 introduz-se apenas um declive suave nos degraus. O objetivo é o de avaliar a resposta do programa em situações de maior ou menor constrangimentos geométricos.

Observa-se que o tomograma da figura 2.4b é mais próximo do modelo sintético que o gerou (com RMS de 1%), em comparação com o tomograma representado na figura 2.4a gerado pelo modelo sintético de dois degraus com descida e subida brusca (RMS 1.3%). Isto Significa que, quanto menor forem os constrangimentos na geometria do modelo sintético mais próximo do real será o tomograma. Esta conclusão resulta da comparação dos tomogramas das figuras 2.3 e 2.4, isto é, os tomogramas gerados por modelos sintéticos de um degrau são mais próximos do modelo de partida do que aqueles gerados por modelos sintéticos de dois degraus.

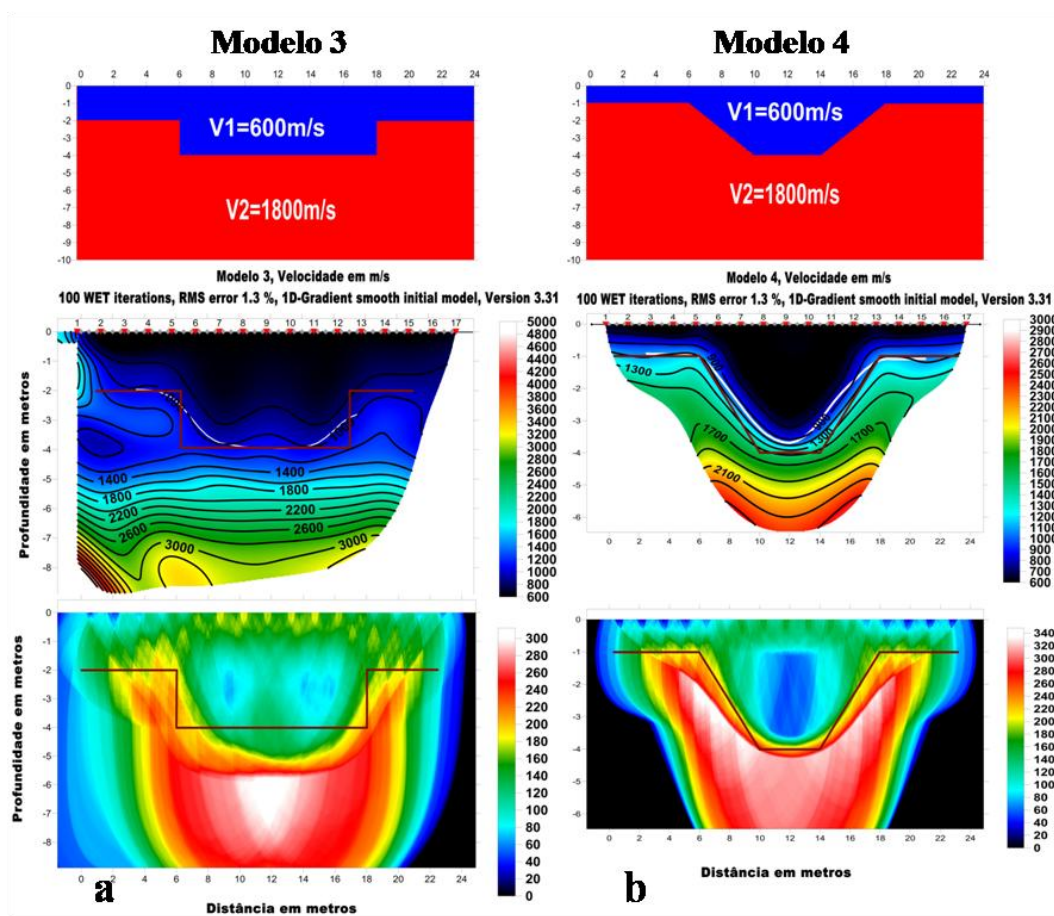


Figura 2.4 Modelos sintéticos 3 e 4.

Figura do topo: Modelos em escada com descida brusca e suave. Figura central: Modelo invertido de velocidades (tomograma). Em baixo: figura de cobertura de raios. Os detalhes da figura já foram explicados na legenda da figura 2.3.

2.2.3.4 Conclusões e considerações finais a respeito dos modelos sintéticos

Os testes com modelos sintéticos permitiram avaliar a resposta do método de inversão usado, de forma a permitir uma melhor percepção dos tomogramas obtidos no caso do córrego Consciência. Apesar de não mostrar com exatidão a interface, o método tomográfico mostra a zona de transição de velocidades (zona de maior gradiente de velocidades). Isto é útil para estudar regiões sedimentares, pois permite mapear a variação gradual da velocidade em função do aumento da densidade dos sedimentos. Para o caso do córrego Consciência permitiu marcar a zona de início do soco alterado, como irá ser demonstrado mais adiante.

Em <http://rayfract.com/tutorials/thrust.pdf> encontra-se um exemplo de um modelo sintético complexo, mostrando como o método reproduz o modelo sintético com um elevado grau de proximidade. Neste exemplo é possível ainda verificar o melhoramento do tomograma com o aumento do número de iterações. Outra situação, que o referido exemplo clarifica é quando há uma intrusão de uma região de baixa velocidade entre outra de elevada (inversão de velocidade), o exemplo demonstra que para perfis longos e com maior cobertura em número de geofones e tiros é possível mapear tal intrusão.

Pode-se concluir que:

- Os modelos invertidos reproduzem a geometria do modelo sintético com elevado grau de proximidade, ou seja, a profundidade e a distância em que se verifica a linha da interface entre as camadas (linha branca) nos tomogramas é próxima daquelas em que se dá a transição de velocidades nos modelos sintéticos.
- São melhor resolvidos aqueles modelos sintéticos que apresentam menor complexidade geométrica. Por exemplo, os modelos de um ou dois degraus com descidas suaves, geram modelos mais próximos do real do que aqueles que apresentam descidas bruscas. Pode concluir-se também que os modelos de velocidades gerados por modelos de um degrau são mais próximos do modelo sintético do que aqueles gerados por modelos de dois degraus.
- Nos modelos sintéticos estão representadas camadas com velocidades constantes e isto implica uma transição brusca da velocidade na interface. E como era de esperar, nos modelos resultantes esta transição brusca não se verifica. Como descrito no

parágrafo 2.2.2.3, o modelo inicial o 1D-Gradient smooth initial model impõe transições suaves de velocidade com gradiente que varia com a profundidade. Apesar das suas vantagens o método tomográfico introduz gradiente de velocidade numa região em que tal pode não existir (Sheehan et al., 2005).

Em todos os modelos, próximo da zona de transição de velocidades verifica-se um aumento no gradiente de velocidade. Apesar de não marcar com precisão a interface, esta informação é importante pois ajuda a identificar a região onde é mais provável encontra-la nos modelos de velocidade gerados por uma estrutura geológica real que a partida é desconhecida.

2.3 Tomografia de resistividade elétrica

2.3.1 Introdução

O desenvolvimento da informática e computação impulsionou a utilização do método de resistividade elétrica a partir da década de 70, mas sabe-se que o seu desenvolvimento começou a ser feito no início do século XX. O Método resistivo é usado especialmente para localizar água, mapear e monitorar poluição, localizar cavidades subsuperficiais, falhas e fissuras, permafrost, localizar estruturas enterradas (por exemplo na Arqueologia), etc. (Reynolds, 1997).

Este método tem como objetivo identificar contrastes de resistividade elétrica a partir da introdução de corrente elétrica no solo e medição da diferença do potencial resultante. O cálculo da resistividade aparente é feito através da aplicação da lei de Ohm. A partir da distribuição da resistividade aparente, processos de inversão e modelação subjacentes ao método permitem estimar a resistividade do solo em função da profundidade.

São várias as configurações experimentais que, mediante processamento adequado, permitem obter modelos de resistividade mais ou menos vocacionados para determinados tipos de sondagem. Entre as várias técnicas destacam-se: Sondagens Elétricas Verticais (SEV), Perfilagens, sondagens 2-D (tomografia 2-D) e sondagens 3-D (tomografia 3-D). Enquanto nas duas primeiras se considera que a resistividade varia apenas numa direção (vertical ou horizontal) e pode envolver entre 10 a 20 medições, uma sondagem 2-D considera um meio em que a variação da resistividade pode se dar em duas direções (vertical e horizontal) e requer entre 100 a 1000 medições. A sondagem 3-D considera uma variação tridimensional da resistividade e pode requerer milhares de medições, tornando-a mais cara que as anteriores (Loke, 2001).

Neste capítulo far-se-á uma abordagem em volta da teoria geral do método e das diferentes configurações, deixando para o capítulo seguinte a análise dos resultados obtidos na campanha de tomografia 2-D realizada na bacia do córrego Consciência. A Tomografia teve como objetivo produzir modelos de resistividade elétrica através dos quais fosse possível identificar a distribuição espacial da contaminação por metais pesados, mediante uma calibração feita a partir dos resultados produzidos pelos estudos geoquímicos naqueles locais.

2.3.2 A Física de base

O método de resistividade elétrica fundamenta-se nas leis da eletricidade, especialmente na de Ohm, que pode ser enunciada da seguinte forma (Serway and Jewett, 2004, p. 835):

“Para muitos materiais (incluindo metais), a razão entre a densidade de corrente J e o campo elétrico E é uma constante σ (condutividade) que é uma propriedade do meio independente do campo elétrico que produz a corrente.”

$$J = \sigma E \quad \text{Eq. 2.12}$$

“ E ” define um campo conservativo dado pelo gradiente negativo do potencial que o origina ($E = -\nabla U$). Então, a relação entre a densidade de corrente e o potencial elétrico U pode ser dado por (Loke, 2001):

$$J = -\sigma \nabla U \quad \text{Eq. 2.13}$$

Seja um elemento de volume ΔV no interior do qual existe uma fonte de corrente I na posição (x_s, y_s, z_s) . A relação entre o potencial e a corrente no ponto (x, y, z) pode ser estabelecida por (Dey and Morrison, 1979a):

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla(x, y, z)] = \left(\frac{I}{\Delta V}\right) \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad \text{Eq. 2.14}$$

Em que δ é a função de Dirac. A relação 2.14 é a equação fundamental que caracteriza a distribuição do potencial num meio e a sua solução permite mapear a distribuição da condutividade no meio.

No método elétrico usa-se mais frequentemente a resistividade ρ que é o inverso da condutividade, isto é, $\rho = 1/\sigma$ e que no S. I. se exprime em Ohm metros ($\Omega.m$). Tal como a condutividade, ela é uma propriedade que caracteriza o meio pelo qual circula a corrente elétrica. Quando o meio é a subsuperfície, o conhecimento dessa propriedade permite obter informações a respeito das rochas que o constituem. Porém, a resistividade depende da temperatura, da porosidade da rocha e do seu nível de saturação. Esta foi a conclusão empírica a que Archie chegou e que levou a formulação da relação matemática conhecida como Lei de Archie (Reynolds, 1997):

$$\rho = a \Phi^{-m} S^{-n} \rho_w \quad \text{Eq. 2.15}$$

Em que ρ e ρ_w são a resistividade da rocha e a resistividade do fluido nos poros, respetivamente; Φ é a porosidade, s é a fração volúmica do fluido contido nos poros; a , m e n são constantes.

Os valores da resistividade elétrica para diferentes rochas, solos e minerais são conhecidos e estão bem documentados na literatura. A tabela 2.4 apresenta valores médios da resistividade para alguns materiais.

Material	$\rho(\Omega m)$	Material	$\rho(\Omega m)$
Quartzo ¹	$3 \times 10^2 - 10^6$	Água doce subterrânea ²	$10 - 10^2$
Sal-gema ¹	$3 \times 10 - 10^{13}$	Ferro ²	$\sim 10^{-7}$
Antracite ¹	$10^{-3} - 2 \times 10^5$	Xisto (grafite) ¹	$10 - 10^2$
Granito ¹	$3 \times 10^2 - 10^6$	Argila ¹	$1 - 10^2$
Granito	$3 \times 10 - 5 \times 10^2$	Aterro saturado ¹	15-30
Gabro ¹	$10^3 - 10^6$	Aterro não saturado ¹	$30 - 10^2$
Permafrost ¹	$10^3 - > 10^4$	Solo arenoso e seco ¹	80-1050
Aluviões ²	$10 \sim 10^3$	Solo superficial ³	$50 - 10^2$
Basalto ¹	$10 - 1.3 \times 10^7$	Arenito ¹	$1 - 7.4 \times 10^8$
Prata ⁴	1.59×10^{-8}	Cobre ⁴	1.7×10^{-8}
Alumínio ⁴	2.82×10^{-8}	Chumbo ⁴	22×10^{-8}
Platina ⁴	11×10^{-8}		

Tabela 2.4. Resistividade elétrica de alguns materiais geológicos.

Fonte: 1-Reynolds (1997); 2- Loke (2001); 3-Milsom (2003); 4-Serway and Jewett, 2004.

2.3.2.1 O potencial elétrico num semi-espço homogéneo

Seja um semi-espço homogéneo de resistividade ρ , no qual se injeta corrente elétrica considerando apenas um elétrodo de injeção, sendo o outro colocado a uma distância muito grande, tal que sua influência é negligenciável (figura 2.5). O potencial elétrico U a uma distancia r é dado por:

$$U_r = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Em que r é a distância entre o ponto de injeção de corrente e o ponto de medição do potencial. Para este caso a distribuição do potencial é radial e a direção da corrente é em cada ponto perpendicular às equipotenciais (figura 2.5).

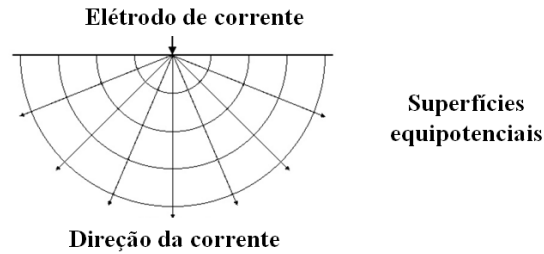


Figura 2.5. Distribuição da corrente elétrica num semi-espaço homogêneo
 Considera-se apenas um eletrodo de corrente (adaptada de Loke, 2001).

Considere-se agora que a injeção de corrente é feita em dois pontos (elétrodos de injeção ou de corrente C1 e C2). Neste caso as linhas equipotenciais têm um comportamento simétrico em relação ao ponto médio entre os elétrodos de corrente. Sejam P1 e P2 dois elétrodos de Potencial, isto é, pontos entre os quais é feita a medição da diferença de potencial, (figura 2.6).

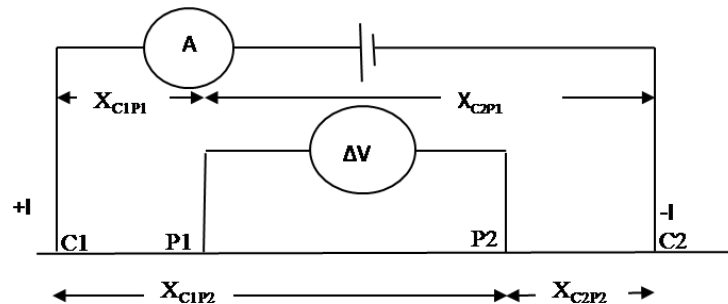


Figura 2.6. Esquema de injeção de corrente e medição do potencial.
 Na figura os pontos C1 e C2 representam os elétrodos de corrente, e os pontos P1 e P2, os de potencial.

O potencial medido nos pontos P1 e P2 é influenciado simultaneamente pelos elétrodos C1 e C2, logo, o potencial nestes pontos é dado por:

No ponto P1 o potencial será:

$$U_{P1} = U_{C1} + U_{C2} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Em que U_{C1} é o potencial no ponto P1 por ação do eletrodo C1 e U_{C2} é o potencial no ponto P2 por ação do eletrodo C2.

Tendo em conta a expressão 3.5, obtemos para o ponto P1:

$$U_{P1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{C1P1}} - \frac{1}{X_{C2P1}} \right) \quad \text{Eq. 2.18}$$

Analogamente obtém-se para o ponto P2:

$$U_{P2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{C1P2}} - \frac{1}{X_{C2P2}} \right) \quad \text{Eq. 2.19}$$

Desta forma, a diferença do potencial entre os pontos P1 e P2 é dada por:

$$\Delta U = U_{P1} - U_{P2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{X_{C1P1}} - \frac{1}{X_{C2P1}} \right) - \left(\frac{1}{X_{C1P2}} - \frac{1}{X_{C2P2}} \right) \right] \quad \text{Eq. 2.20}$$

A resistividade será:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{X_{C1P1}} - \frac{1}{X_{C2P1}} \right) - \left(\frac{1}{X_{C1P2}} - \frac{1}{X_{C2P2}} \right) \right]} \quad \text{Eq. 2.21}$$

Simplificadamente:

$$\rho = RK \quad \text{Eq. 2.22}$$

Em que:

$$R = \frac{\Delta U}{I} \text{ e } K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{X_{C1P1}} - \frac{1}{X_{C2P1}} \right) - \left(\frac{1}{X_{C1P2}} - \frac{1}{X_{C2P2}} \right) \right]} \quad \text{Eq. 2.23}$$

K é designado por fator geométrico por depender somente das coordenadas dos pontos de injeção e de leitura.

Em prospeção geolétrica pelo método resistivo os elétrodos são dispostos de diferentes formas, o que dá origem a diferentes fatores geométricos e consequentemente, diferentes configurações, tais como as apresentadas na figura 2.7 (adaptada de Loke, 2001).

Notar que nas configurações Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo e Wenner-Schlumberger há que considerar dois parâmetros: a separação “a” entre os pares de elétrodos e “n” que é a razão entre a distância entre os pares de elétrodos C1-C2 e P1-P2 e o espaçamento “a”. O valor de “n” é normalmente um número inteiro positivo, mas também pode assumir valores positivos não inteiros (Loke, 2001).

Os valores da resistividade calculados nestas condições não são reais, mas sim aparentes. A relação entre a resistividade aparente e a resistividade real do solo é estabelecida através do processo de inversão.

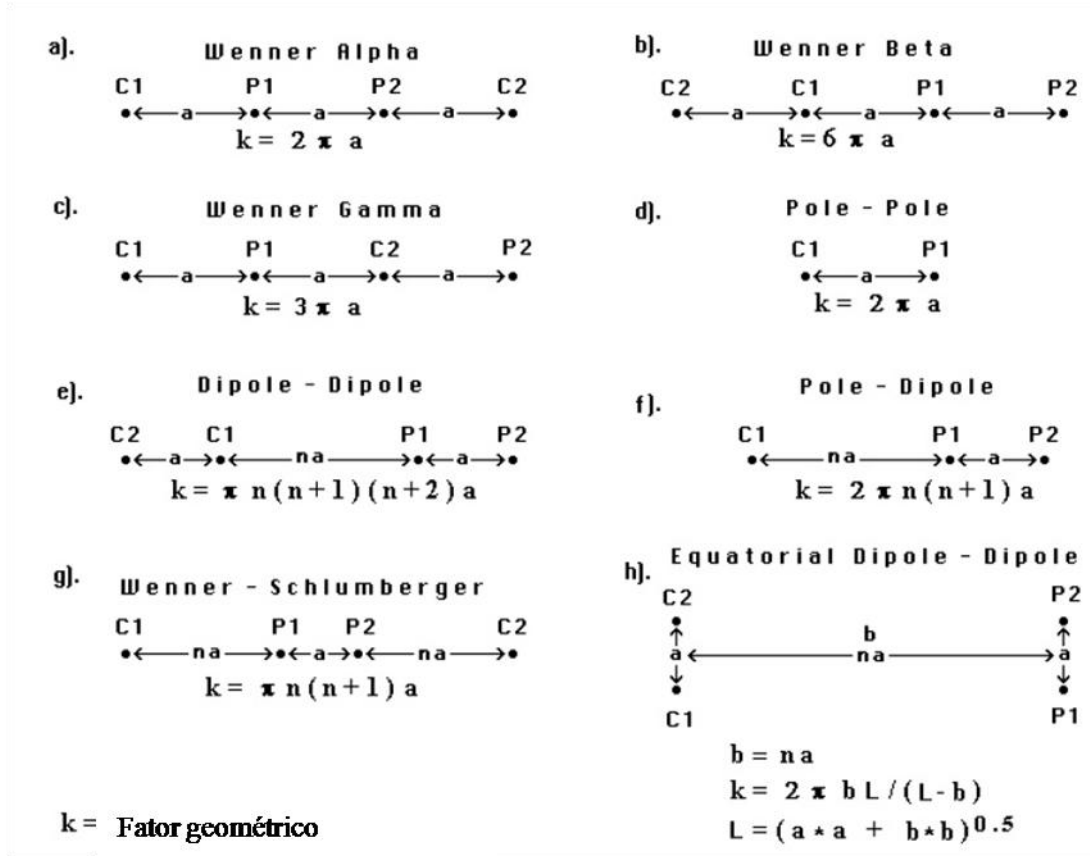


Figura 2.7. Configurações habitualmente empregues e respetivos fatores geométricos
 Adaptada de Loke (2001).

2.3.3 Inversão

Como dito no ponto 2.1 existem vários métodos de resolução do problema inverso, destaca-se aqui neste trabalho o método de minimização local de Gauss-Newton com constrangimentos de suavização, o denominado “smoothness-constrained, least-squares method” (deGroot-Hedlin and Constable, 1990):

$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta q = J^T g \quad \text{Eq. 2.24}$$

em que “ Δq ” é uma perturbação aos parâmetros do modelo “ q ”; “ J ” é a matriz Jacobiana das derivadas parciais dos dados teóricos relativamente aos parâmetros do modelo. A constante “ λ ” é o fator de suavização que depende do ruído nos dados, “ C ” é uma matriz cujos elementos permitem balancear as variações da resistividade em cada direção (para modelos 2-D ou 3-D) e $g = f - p$ é o vetor erro (Loke and Barker, 1995).

O processo de inversão é feito em basicamente três passos, segundo o algoritmo proposto por Loke e Barker (1995):

1. Cálculo da resistividade aparente do modelo inicial, “ q_0 ”. O modelo inicial é obtido considerando um semi-espço homogéneo cuja resistividade “ ρ ” é determinada através da média da resistividade aparente medida, isto é:

$$q_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_i \quad \text{Eq. 2.25}$$

Em que “ f_i ” é um vetor com “ m ” valores de resistividade aparente medidas (ou observadas). Uma vez que o valor de resistividade do modelo inicial é o mesmo em todos os pontos, a resposta inicial do modelo p_0 também é a mesma. Então, o vetor erro pode ser dado por $g=f-p_0$

2. Cálculo da matriz “ J ” -McGillivray e Oldenburg (1990) apresentam várias formas de calcular as derivadas que constituem a matriz “ J ” – que poderá ser feito usado o método das diferenças finitas (Dey and Morrison 1979a; Loke, 1994) ou o de elementos finitos (Silvester and Ferrari 1990).
3. Finalmente resolve-se a equação dos mínimos quadrados (equação 2.24) para estimar a perturbação “ Δq ” do modelo. Em seguida soma-se a perturbação nos parâmetros do modelo “ Δq ” ao modelo inicial “ q_0 ” para obter “ q_1 ”, que é a primeira aproximação ao modelo que se pretende, isto é,

$$q_1 = q_0 + \Delta q \quad \text{Eq. 2.26}$$

Repete-se o processo sucessivamente até que os valores de “ p ” sejam mais próximos possíveis dos valores medidos “ f ”, ou seja, minimizar a norma do vetor resíduo.

A equação de minimização pode tomar várias formas, dependendo das informações que são introduzidas de modo a responder a várias situações, tais como, variações suáveis de resistividade, tomando a forma da modificação “ L_2 norm inversion” (Ellis and Oldenburg 1994a) ou variações bruscas da resistividade, tomado a forma da modificação “ L_1 norm inversion” (Wolke and Schwetlick 1988).

Para mais detalhes sobre a inversão, modelação e técnicas de campo relativas ao método de resistividade elétrica, citam-se os seguintes trabalhos: Lines and Traitel, 1984; Loke, 1994 e 1999; Loke and Barker 1995; 1996a, 1996b e 2002.

2.3.4 Algumas características das configurações

Diferentes configurações originam modelos diferentes, por isso, ao planejar uma campanha deve-se selecionar convenientemente a configuração a usar. Para tal deve ter-se em consideração alguns condicionalismos, tais como: 1) profundidade de investigação, 2) sensibilidade 3) cobertura horizontal e 4) intensidade do sinal.

A profundidade de investigação refere-se a profundidade abaixo da qual o potencial medido à superfície é insensível a variação das propriedades elétricas do meio (Oldenburg and Li 1999). Existe muita controvérsia acerca deste assunto entre os investigadores, visto que a profundidade de investigação depende de vários fatores, tais como, a distribuição da resistividade na subsuperfície, os efeitos da variação da resistividade na direção perpendicular à linha de investigação, a sensibilidade à deteção de variações de resistividade, a razão sinal-ruído, etc. Vários estudos têm sido feitos a esse respeito (Roy and Apparao, 1971; Edwards, 1977; Barker, 1989; Oldenburg and Li 1999). Atualmente considera-se a abordagem na qual a profundidade de investigação está relacionada com a função sensibilidade que varia segundo a configuração considerada.

A sensibilidade é função da profundidade de investigação, isto é, determina o grau de variação do potencial medido à superfície em função da variação da resistividade num elemento de volume dV . Quanto maior for a sensibilidade maior será a influência da região subsuperficial (Loke and Berker, 1995). Na realidade o que a sensibilidade nos informa é o grau de variação do potencial δU se num elemento de volume dV na subsuperfície for produzida uma variação de resistividade $\delta \rho$.

A configuração Wenner tem uma profundidade de investigação média (cerca de 0.5 vezes a separação dos elétrodos). Apresenta uma sensibilidade horizontal baixa, mas alta na direção vertical. A intensidade do sinal é inversamente proporcional ao fator geométrico e, por este ser menor do que os das outras configurações, Wenner apresenta a mais forte intensidade de sinal. Uma desvantagem desta configuração é a baixa cobertura horizontal (ou Loke, 1999).

A configuração Dipolo-dipolo apresenta um baixo acoplamento eletromagnético, é mais sensível a variações horizontais de resistividade e pouco sensível a variações verticais. Tem uma baixa profundidade de investigação (comparando com Wenner), mas tem uma boa cobertura horizontal. A principal desvantagem é o rápido enfraquecimento do

signal, por exemplo para um certo valor de corrente o sinal decresce 200 vezes ao aumentar o espaçamento entre os eléctrodos do corrente e de potencial de 1 a 6 (Loke, 1999).

A configuração Wenner-Schlumberger é sensível tanto horizontal como verticalmente. Em relação a configuração Wenner, tem uma profundidade de investigação cerca de 10% maior, cobertura horizontal ligeiramente maior e intensidade de sinal inferior, porém maior que a da configuração dipolo-dipolo (Loke, 1999).

A configuração Polo-polo tem a maior cobertura horizontal, maior profundidade de investigação, mas apresenta a pior resolução entre todas as configurações (Loke, 1999).

Estas são algumas características que ajudam na selecção da melhor configuração para certa situação. A tabela 2.5 apresenta de forma resumida estes aspetos.

Configuração	Identificação de estruturas horizontais	Identificação de estruturas horizontais	Prof. de investigação	Resposta do sinal	Cobertura do sinal
Wenner	A	C	B	A	C
Schlumbergerr	B	B	B	B	B
Dipolo-dipolo	C	A	B	C	A
Polo-polo	C	C	A	B	A

Tabela 2.5 Algumas características das principais configurações A, B e C do mais adequado ao adequado (Oliveira, 2009).

2.3.5 Erros nas medições e/ou na inversão

Tanto durante a aquisição dos dados como durante o processamento deve-se ter cuidados para evitar erros. Seguem alguns erros muito comuns (Loke, 2001):

- Uso incorreto da configuração dipolo-dipolo. Exemplo valores de “**n**” superiores a 6 sem alterar o valor de “**a**”;
- Fraco contacto dos eléctrodos com o solo;
- Fraca penetração da corrente eléctrica;
- Não dar o devido tempo de decaimento da corrente, isto é, quando um eléctrodo é usado como eléctrodo de corrente haverá um acumulo de carga a volta do mesmo que demora algum tempo para se dissipar. Se imediatamente este for usado como eléctrodo de potencial os valores medidos podem não ser corretos;

- Erros no campo, tais como curto-circuitos devido a presença de objetos metálicos;
- Influência da variação da resistividade na direção perpendicular à linha de observação quando se leva a cabo uma campanha 1-D ou 2-D;
- Limites das leis do método de resistividade, isto é, a resolução do método diminui exponencialmente com a profundidade, de tal forma que, por exemplo, torna-se difícil identificar uma estrutura de 1 metro que se encontra a 10 metros de profundidade;
- A não unicidade das soluções no problema inverso.

3-0 caso do córrego Consciência

3 O caso do córrego Consciência

3.1 Enquadramento da região em estudo

3.1.1 Localização geográfica

O córrego Consciência é um afluente do rio São Francisco, localizado próximo a cidade de Três Marias, no estado de Minas Gerais no Brasil (figura 3.1).

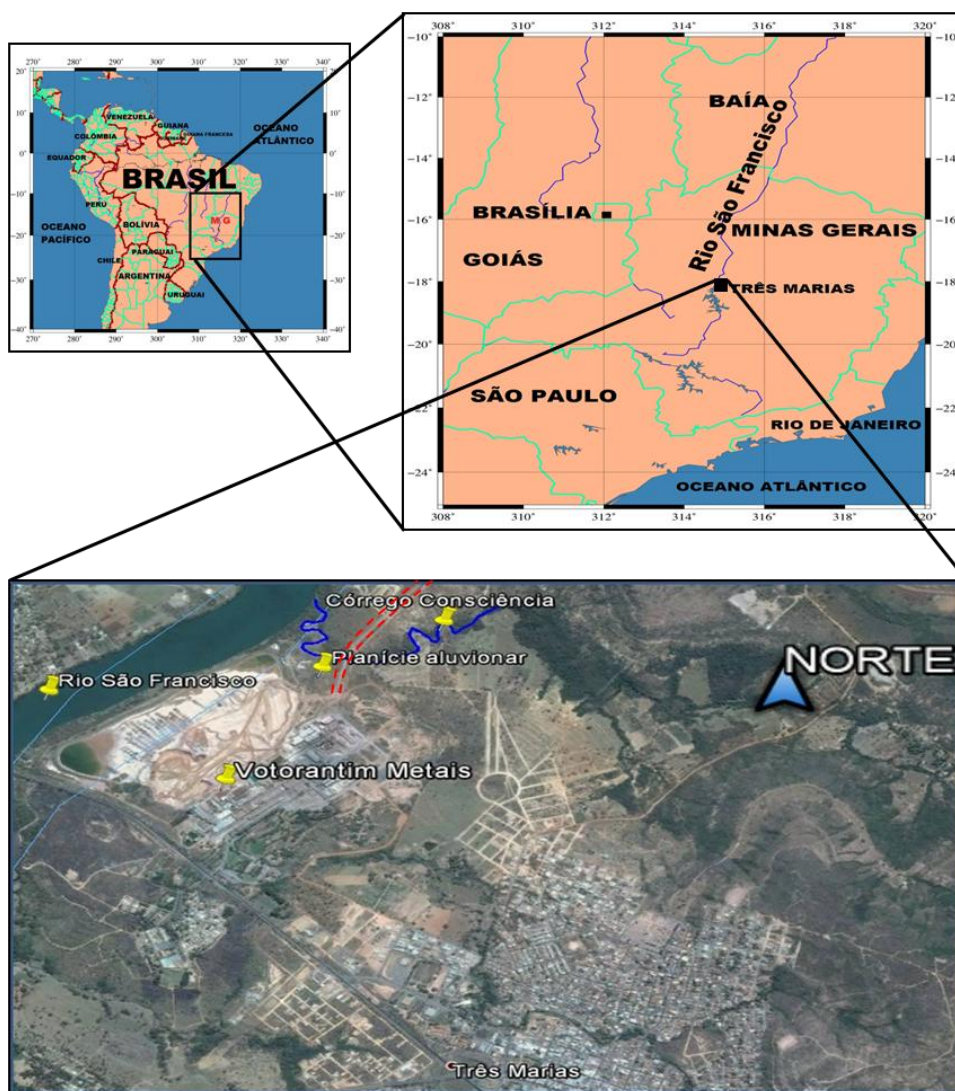


Figura 3.1 Localização do estado brasileiro de Minas Gerais, da cidade de Três Marias, da Votorantim Metais e do córrego Consciência (linha azul). As linhas vermelhas tracejadas marcam uma estrada batida construída em 2010 (mais considerações a respeito desta estrada são dadas no ponto 3.1.2).

3.1.2 Topografia e Geoquímica

A partir das curvas de nível fornecidas pela empresa Votorantim Metais - após digitalização das isolinhas, transformação de unidades, importação para o *software*

Surfer12 para interpolação para uma malha regular (espaçada em metros) – gerou-se o modelo digital de terreno de toda a área de estudo, incluindo aquela ocupada pela fábrica e que está representado na figura 3.2. Nela verifica-se uma região de aproximadamente 153959 m², com altitudes a variar de 505 a 509 metros numa topografia não muito irregular, cuja cobertura é caracterizada essencialmente por sedimentos e depósitos de aluviões, a que se chamou planície aluvionar. As linhas vermelhas e castanhas na figura 3.2 encerram os setores onde a campanha geofísica foi realizada (setores A e B, respetivamente).

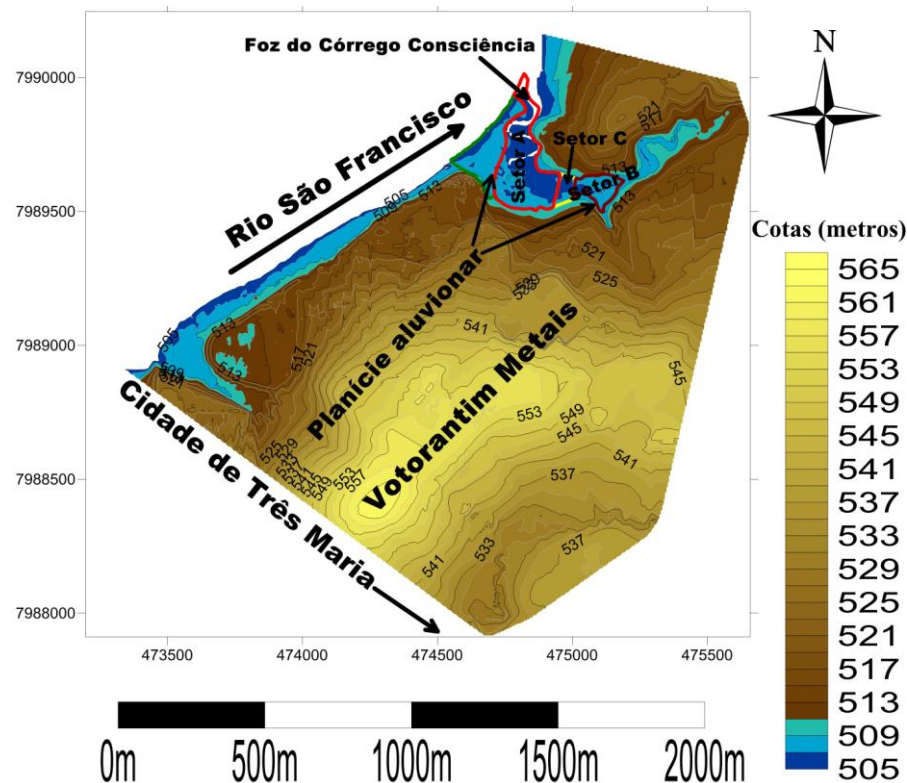


Figura 3.2 Modelo digital com as cotas em metros.

As linhas vermelhas e castanha encerram as áreas dentro da planície onde foram realizados os perfis tanto de sísmica como os de elétrica (os perfis estão representados nas figuras 3.5 e 3.18). Os eixos estão em coordenadas UTM (WGS84, Zona 23K). A linha amarela encerra o setor C (o aterro representado pelas linhas vermelhas na figura 3.1 apenas na parte do córrego). A linha verde, a Oeste do setor A, encerra uma região que não é caracterizada por depósitos de aluviões a superfície, por esta razão ficou de fora da área alvo de reabilitação (consultar conclusões dos resultados da tomografia sísmica para mais informações e considerações importantes sobre esta região). A foz do córrego Consciência apresenta uma cota igual a do rio São Francisco (504 metros representada pela cor branca). Mais para dentro da bacia a cota vai aumentando em direção ao setor C (passando por 505, representada pela cor azul escura) e assim por diante.

O espaço entre os setores A e B (no interior da linha amarela) é um aterro feito aquando da construção em 2010 da estrada de terra batida (linhas vermelhas tracejadas na

figura 3.1) que dá acesso a uma barragem de dragagem localizada a Norte da fábrica. Ao aterro chamou-se setor C, tido em conta apenas na estimativa do volume de sedimentos (Capítulo IV). A execução desta obra implicou a construção de canais de escoamento da água do córrego Consciência sob a estrada. Em períodos de intensa chuva, os canais não possuem diâmetro suficiente para permitir o escoamento, não só da água, mas também dos sedimentos por ela transportados, pelo que no lado Este da estrada (setor B) se verifica um processo de assoreamento rápido que não ocorre no lado oposto da estrada (setor A). Desta forma é de esperar que a camada de sedimentos seja mais espessa no setor B do que no setor A, como veio a provar-se pelos resultados dos perfis sísmicos. A figura 3.3 mostra uma cerca que ficou enterrada devido ao processo de assoreamento no setor B. Constatou-se também neste setor a presença de objetos, tais como, pedaços de plástico, arames, etc., que tiveram influência nas medições, principalmente no método de resistividade elétrica.



Figura 3.3 Cerca enterrada pelo assoreamento no setor B.

A chega-se a esta conclusão comparando com a mesma cerca em anos anteriores ou fora deste setor.

De acordo com o mapa geológico do Brasil à escala 1/100.000, Folha Três Marias – SE.23-Y-B-III (2011), a geologia da região é dominada por uma sequência sedimentar de idade neoproterozóica, a Formação de Três Marias, que faz parte do Grupo Bambuí. Localmente, a Formação de Três Marias, é constituída por arenitos finos quartzo-feldspáticos alternantes com pelitos e siltitos em bancadas decimétricas, sub-horizontais.

Sobre esta formação ocorrem pontualmente depósitos aluvionares relacionados com a atual rede de drenagem (Araújo et al., 2013).

A realização da campanha Geofísica nesta região ocorreu no âmbito do projeto Votorantim contratualizado entre a empresa brasileira Votorantim Metais e a Universidade de Évora (por intermédio do Centro de Geofísica de Évora-CGE). O contrato iniciado em Junho de 2013 e com duração de três anos, tem como objetivo principal a elaboração de uma proposta de medidas de reabilitação ambiental nas áreas contaminadas pela fábrica. Na primeira fase o projeto envolveu a caracterização da contaminação do solo na zona envolvente à fábrica de transformação de zinco (Votorantim Metais), que à partida se sabia com elevados teores em metais. O contrato com a Universidade inclui análises químicas dos solos e aluviões, por isso, foram realizadas campanhas de recolhas de amostras nas regiões localizadas nas bacias do córrego Consciência e Barreiro Grande e no leito do córrego Consciência. Resultados preliminares revelam concentrações críticas de metais tais como, o Zinco, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cobalto e Arsénio, especialmente na região planáltica da bacia do córrego Consciência e ao longo do seu leito (Fonseca, 2014). No anexo 1.1 estão representados os mapas de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para as profundidades (em metros) de 0-0.2, 0.2-0.4, 0.4-0.6. No anexo 1.2 apresenta-se uma tabela com as concentrações dos elementos químicos citados, apenas para alguns pontos junto aos perfis, por isso os pontos apresentados em tal tabela são localizados numa figura apresentada no mesmo anexo.

Verificou-se concentrações moderadas de Ferro, Crómio e Níquel cuja presença aparentemente não está relacionada com a atividade da fábrica. O processo de contaminação dos restantes dá-se essencialmente: i) por escorrência superficial e deposição de partículas sólidas à superfície e, ii) por circulação subterrânea e deposição de sais em profundidade (Araújo et al., 2013).

3.2 Tomografia sísmica aplicada ao caso concreto

3.2.1 Aquisição dos dados

A campanha de recolha de dados foi realizada nos meses de Agosto e Setembro de 2014. Para tal usou-se um sismógrafo ANTEO 1.0 (ANTEO CU) de 48 canais alimentado por uma bateria de 12V, cabos com conversores digitais de 24 bits individuais (ANTEO AD6-x) ligados a geofones de 50 Hz. O sinal é digitalizado diretamente no geofone, minimizando, deste modo, a razão sinal/ruído. A fonte consistiu num martelo (marreta) de 7kg, que embatia sobre uma placa metálica. Os geofones foram colocados em números iguais dum e doutro lado do sismógrafo dispostos segundo um perfil linear (figura 3.4).



Figura 3.4 Equipamento e esquema de um perfil sísmico

Esquerda: Equipamento PASI e esquema de ligações para um conjunto 48 geofones.

Direita: Exemplo de um dos perfis realizados na área em estudo.

Como referido anteriormente, identificaram-se três regiões no interior da planície caracterizadas por depósitos aluvionares (setores A, B e C da figura 3.5), nas quais se realizaram 8 perfis sísmicos. Os perfis foram distribuídos ao longo dos setores de modo a obter resultados representativos, isto é, foram feitos de forma a obter informações quer dos limites da planície, quer do seu interior. A tabela 3.1 apresenta em resumo informações sobre os perfis de tomografia de refração sísmica efetuados.

Perfil	Orientação	Nº tiros	Espaçamento (m)	Pos. do 1º tiro em relação o 1º geofone (m)	Nº geofones	Espaçamento (m)
1	E-W	17	1.5	-0.25	48	0.5
2	W-E	17	1.5	-0.25	48	0.5
3	NW-SE	16	1.5	-0.25	48	0.5
4	N-S	9	3	-0.25	48	0.5
5	S-N	17	1.5	-0.25	48	0.5
6	SE-NW	17	1.5	-0.25	48	0.5
7	W-E	17	1.5	-0.25	48	0.5
8	W-E	17	1.5	-0.25	48	0.5

Tabela 3.1 Dados dos perfis sísmicos realizados.

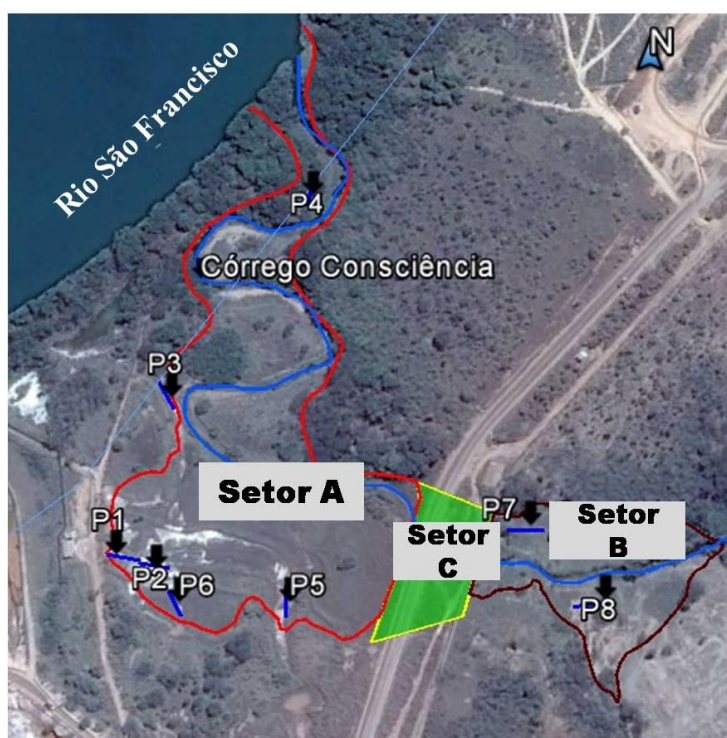


Figura 3.5 Localização dos perfis sísmicos

As linhas azuis mais curtas são os perfis sísmicos. A linha azul maior localiza o córrego Consciência e as linhas vermelha, castanha e amarela limitam os setores A, B e C respectivamente

3.2.2 Processamento

Depois da aquisição dos dados passou-se ao processamento usando o *software* Rayfract, obedecendo os seguintes passos:

- Criação do projeto no Rayfract e importação dos dados;
- Picagem das primeiras chegadas;
- Geração do modelo inicial;
- Inversão;

Os detalhes da criação de um novo projeto no Rayfract e a importação dos dados estão apresentados no anexo 2.2.

A picagem das primeiras chegadas tem o objetivo de obter os tempos medidos (tempo de percurso da onda P refratada) para a criação dos gráficos tempo-distância. A figura 3.6 mostra a secção sísmica com as picagens das primeiras chegadas do 8º tiro do 8º perfil e o correspondente gráfico tempo-distância.

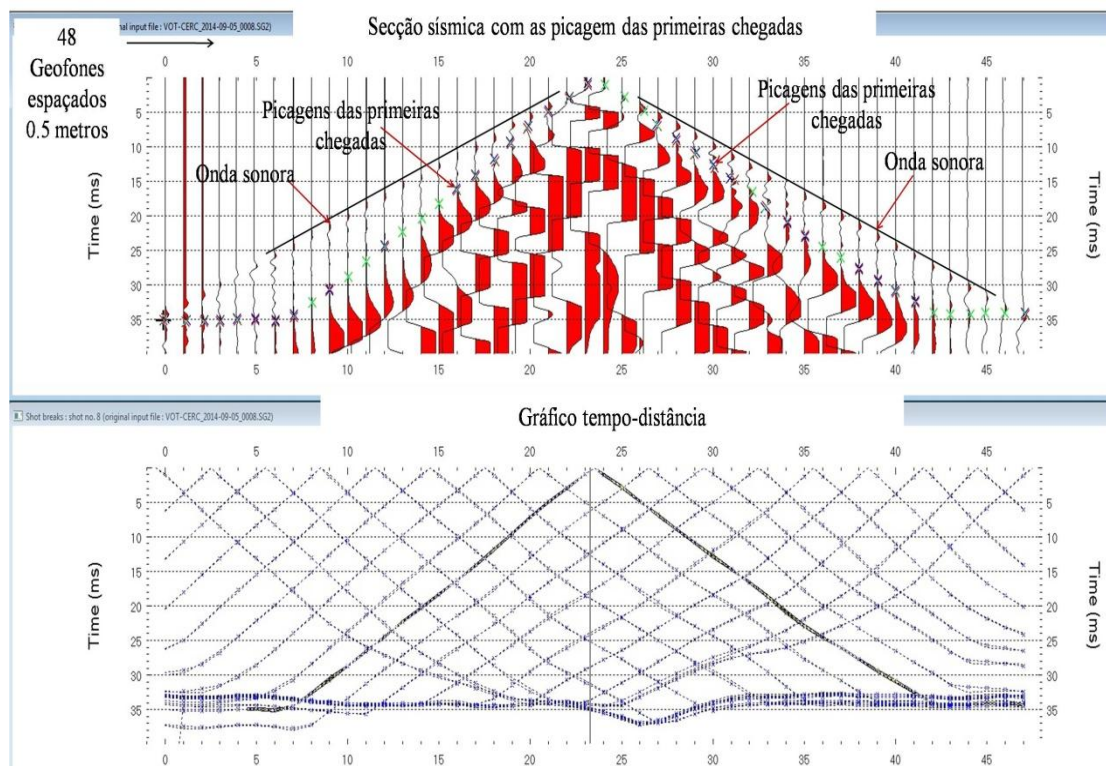


Figura 3.6 Secção sísmica e gráfico tempo-distância para o 8º tiro do 8º perfil

Secção sísmica com picagens (topo) e gráfico tempo-distância (baixo). A picagem dos tempos de chegada é representada por cruzes vermelhas. As cruzes azuis representam os tempos teóricos e as verdes os pontos onde há coincidência entre os tempos medidos e os teóricos. No eixo horizontal estão representadas as posições dos geofones espaçados 0.5 metros e no eixo vertical estão os tempos em milissegundos. As duas retas pretas sobre a secção sísmica mostram o percurso da onda sonora.

Pode-se verificar na figura 3.6 uma fase que chega antes das picagens feitas, tal corresponde a chegada da onda sonora, facilmente identificada, uma vez que o inverso do

declive da reta das primeiras chegadas desta fase é aproximadamente igual a velocidade do som.

Em seguida o modelo inicial foi gerado pelo método XTV descrito no parágrafo 2.2.2. O 1D-Gradient Smooth Initial Model, é gerado a partir do Pseudo-deltaV (parágrafo 2.2.2.3). Os modelos iniciais de todos os perfis são apresentados no anexo 3.

A inversão foi feita com base no algoritmo de Schuster e Bosz apresentado no parágrafo 2.2.2, baseado na fórmula de retroprojeção. Em quase todos os perfis a inversão terminou depois de 100 interações, com exceção do terceiro e sétimos perfis que foram necessárias 200 interações de modo a baixar o RMS.

Importa ainda referir que a cota de referência usada para a correção topográfica é a de 505 metros (UTM, WSG84, Zona 23K). Isto quer dizer que nos tomogramas apresentados 0 metros corresponde esta cota de referência. Então introduz-se dois conceitos: 1-profundidade absoluta, aquela representada nos gráficos da variação da velocidade com a profundidade (a direita de cada tomograma) considerando que a superfície livre tem cota 0, e 2- profundidade relativa, aquela apresentada nos tomogramas, relativas aos 505 metros.

3.2.3 Resultados e discussão

Como foi demonstrado através dos testes feitos em modelos sintéticos o *software* permite mapear a profundidade da camada refratora que se considera corresponder à base dos aluviões. Para meios em que a variação da velocidade é subtil, isto é, não há uma descontinuidade clara na transição entre os dois meios, mas sim um gradiente de velocidades, torna-se uma tarefa difícil fazer tal mapeamento. No entanto é possível identificar nos tomogramas uma zona de maior gradiente de velocidade, e, como se constatou nos modelos sintéticos, esta variação deverá marcar o início de uma camada com características diferentes da inicial, e isto serviu de referência na interpretação dos tomogramas.

Outro elemento de controlo usado na interpretação dos resultados obtidos foi o material geológico recolhido na sanja aberta junto ao ponto inicial do sexto perfil, cuja estratigrafia se encontra descrita na figura 3.7. A partir da comparação dessa estratigrafia com os resultados do sexto perfil de refração realizado ao lado foi possível estabelecer

uma relação entre os materiais geológicos e o modelo de velocidade obtido para aquele perfil. Por essa razão, a análise dos resultados de refração é iniciada no sexto perfil. A conjugação da informação dos resultados da estratigrafia da sanja com a informação obtida a partir dos testes em modelos sintéticos (especialmente o aumento do gradiente de velocidade) permitiu definir uma velocidade de referência em todos os tomogramas, que marca o nível do início do soco alterado, ainda que tal não corresponda, necessariamente, à profundidade em que se encontra o soco (que deve ser mais profundo).

A estratigrafia da sanja revela alterações significativas na constituição dos materiais geológicos, correspondente à transição entre os sedimentos e o soco alterado a partir da profundidade absoluta de 2.4 metros, o que corresponde a uma velocidade de cerca de 600m/s (figura 3.7). Assinale-se, que a partir deste nível o gradiente de velocidades é cada vez maior em todos os perfis, isto é revelado pela densidade das isolinhas nos modelos de velocidades, bem como os gráficos de variação da velocidade com a profundidade. Isto leva a concluir que em todos os modelos de velocidade a isolinha dos 600m/s assinala o início do soco alterado. Apesar de a velocidade de 600m/s ser relativamente reduzida face aos valores típicos de uma rocha há que considerar que as camadas mais superficiais, correspondentes ao topo do soco, se deverão encontrar muito alteradas, facto que aliás, se constata a partir dos resultados da análise dos materiais geológicos recolhidos na sanja.

Nos tomogramas resultantes da inversão os triângulos vermelhos invertidos marcam a posição dos pontos de tiros, os pontos cinzentos marcam a posição dos geofones e as linhas pretas são isolinhas de velocidade das ondas P espaçadas de 200m/s. As linhas verticais pretas são cortes verticais que correspondem à posição do gráfico da variação da velocidade com a profundidade que se apresenta no lado direito de cada modelo tomográfico. Este gráfico permite uma melhor visualização da variação de velocidade de modo a identificar a zona de maior gradiente.

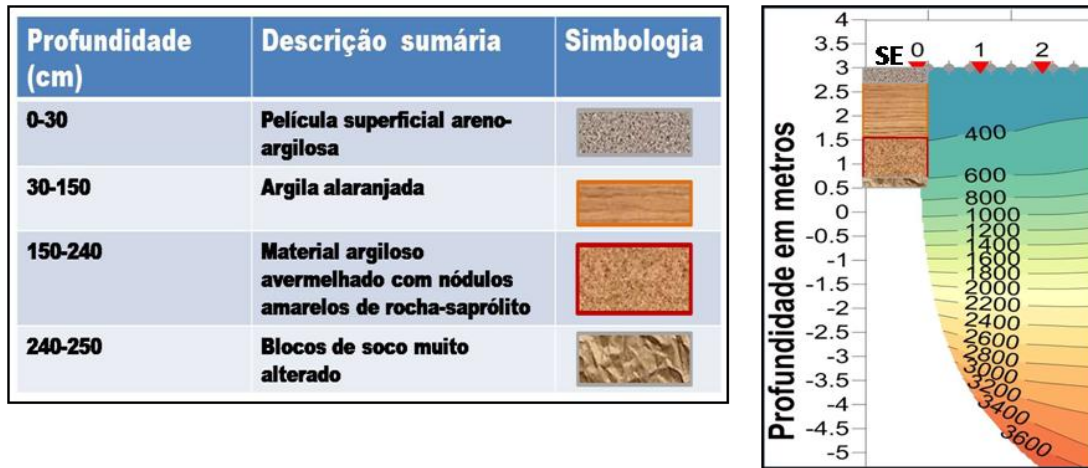


Figura 3.7. Comparação das velocidades das ondas P obtidas no perfil 6 com a estratigrafia da sanja.

Extraída do Relatório de Progresso Sobre a estratégia de Remediação dos Córrego Consciência e Barreiro Grande – 2ª Fase. Évora. Dezembro, 2014. A profundidade de 0 m corresponde à cota de 505 m.

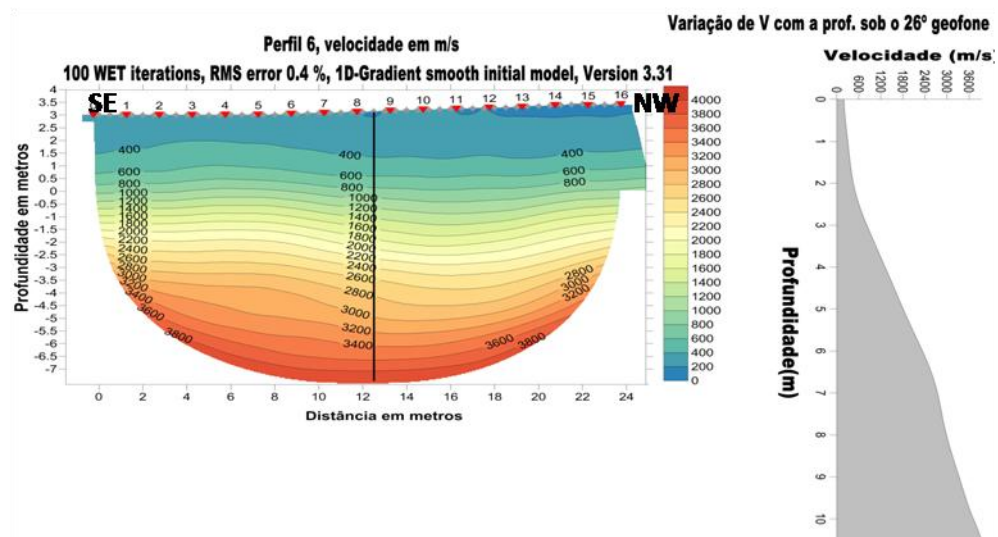


Figura 3.8. 6º Perfil sísmico

À esquerda: Tomograma com orientação SE-NW. Ao lado direito variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone. Nos tomogramas a profundidade é relativa aos 505 metros (UTM, WSG84 Zona 23K), isto é, 0 metros corresponde a esta cota. No gráfico de variação da velocidade considera-se a profundidade absoluta, ou seja, tem-se em conta 0 metros à superfície. Estas considerações são válidas em todas as figuras dos perfis de sísmica.

O primeiro perfil (figura 3.9) foi feito junto a uma encosta localizada no limite da planície. Pode-se verificar que na extremidade Oeste do perfil (lado direito do tomograma) são alcançadas velocidades mais altas a menores profundidades, conforme mostra o gráfico da variação da velocidade com a profundidade, o que revela um aumento de espessura dos sedimentos à medida que se progride para o interior da bacia. A cota da isolinha dos 600m/s apresenta um desnível entre o início e o fim do perfil de cerca de 2.5 metros (mais superficial na extremidade Oeste, com a maior inflexão cerca dos 12m). Esta

topologia acompanha as restantes isolinhas e sugere uma estrutura em degrau por volta dos 12 e 23.5 metros de distância e os 1 e os -0.5 metros, isto é, na parte inicial do perfil a velocidade de referência é alcançada aos 1 metros e na parte final esta é alcançada aos -0.5 metros, fazendo uma profundidade absoluta máxima de 3 metros.

A extremidade inicial do segundo perfil é próxima do primeiro, mas embora paralelo ao anterior desenvolve-se em sentido contrário (de W para E). Verifica-se uma camada com velocidade de 400m/s que vai diminuído de espessura até a extremidade final do perfil (figura 3.10), em concordância com a topografia, e com o modelo de velocidades obtido no primeiro perfil. O início do soco alterado dá-se aos cerca dos -1 metros (3 metros absolutos).

O terceiro perfil foi feito mais a norte dos dois anteriores, muito próximo ao córrego Consciência (figura 3.11), ao passo que o quarto perfil foi feito junto a foz do córrego Consciência (figura 3.12), ambos nos bordos Oeste do setor A. Estes dois perfis revelaram que a estrutura da subsuperfície do setor A parece ser semelhante àquela próxima ao rio São Francisco. Esta revelação levantou a hipótese de se redefinirem os limites do setor A, alargando-os até ao rio. No terceiro perfil a velocidade de referência foi alcançada a cerca de -1 metros (3 metros absolutos) ao passo que no quarto foi aos cerca de -0.5 metros (2.5 absolutos).

O quinto perfil é bastante semelhante ao sexto, e justifica-se por terem sido feitos em direções quase paralelas um relação a outro, junto ao bordo Sul do setor A. Verifica-se que a velocidade de referência é alcançada aos pouco mais de 0.5 metros (2.5 metros absoluto, figura 3.13).

O sétimo e oitavo perfil foram realizados na planície aluvionar Sul. Esta região é caracterizada por aterros, razão pela qual a velocidade de referência é atingida a profundidades mais elevadas em relação aos outros perfis (figuras 3.14 e 3.15). No modelo de velocidades do perfil 7 a velocidade de referência é alcançada aos -0.5 metros (3 metros absolutos). No oitavo perfil esta é alcançada aos cerca de -3 metros (5 metros absolutos) entre os 10 e 14 metros de distância. Isto leva-nos a concluir que esta zona deverá estar sujeita a uma rápida sedimentação, quer por processos naturais quer antropogénicos. Esta hipótese é sustentada pelas características geomorfológicas do terreno e outros indicadores observados à superfície, como descrito no, parágrafo 3.1.2.

Apesar dos sedimentos terem 5 metros de espessura máxima, no cálculo do volume foram considerados 4 metros de espessura, já que a isolinha desta velocidade varia ao longo do perfil entre profundidades que vão de -0.5 metros a pouco mais de -3 metros.

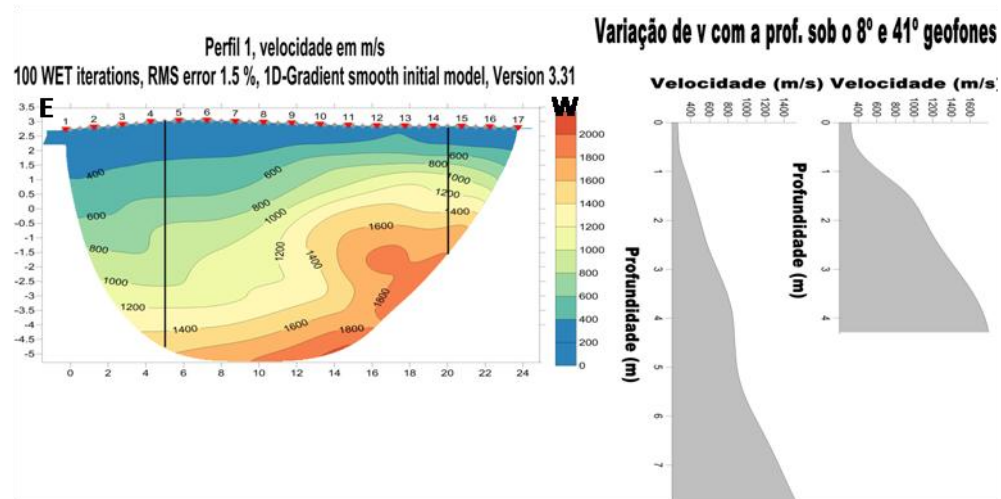


Figura 3.9. 1º Perfil sísmico

À esquerda: Tomograma com orientação E-W. Ao lado direito, variação da velocidade com a profundidade sob o 8° e 41° geofones.

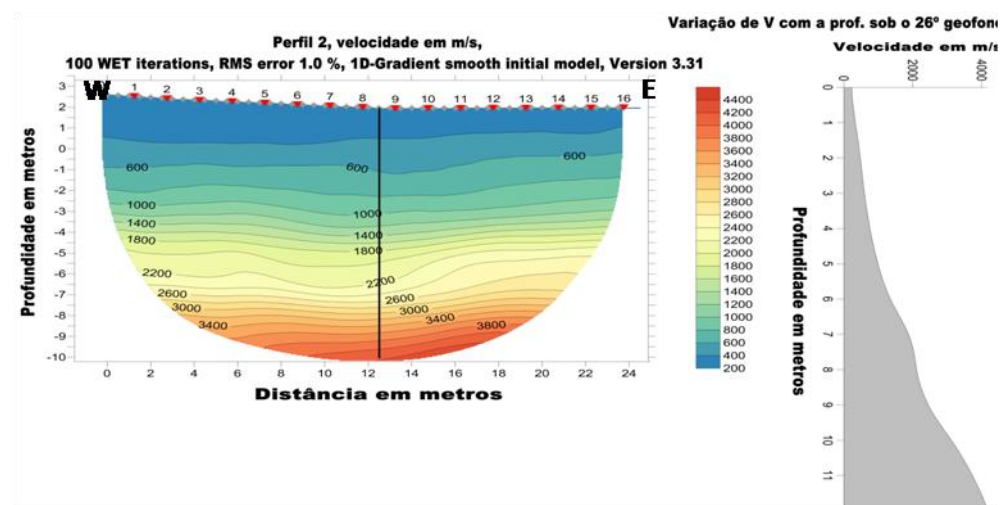


Figura 3.10. 2º Perfil sísmico

À esquerda: Tomograma com orientação W-E. À direita, variação da velocidade com a profundidade sob o 26° geofone.

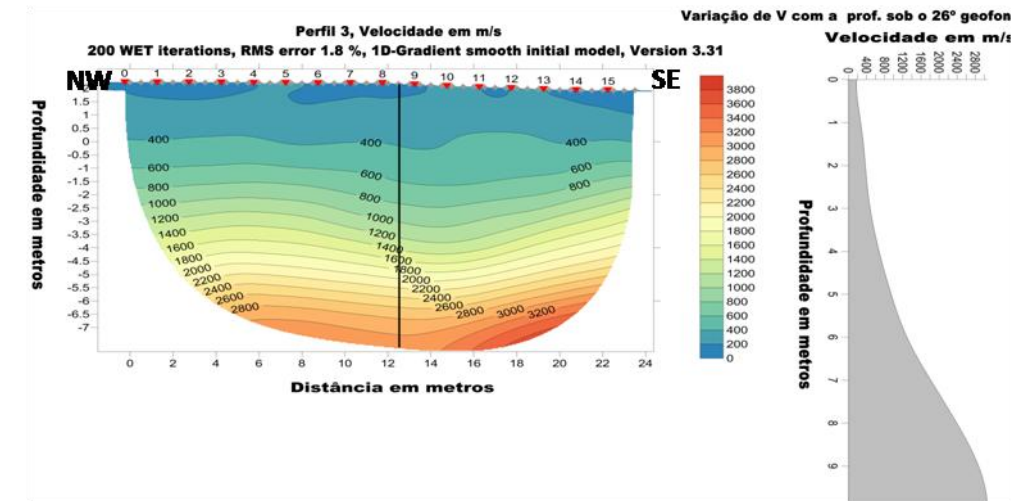


Figura 3.11. 3º Perfil sísmico

À esquerda: Tomograma com orientação NW-SE. À direita, variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone.

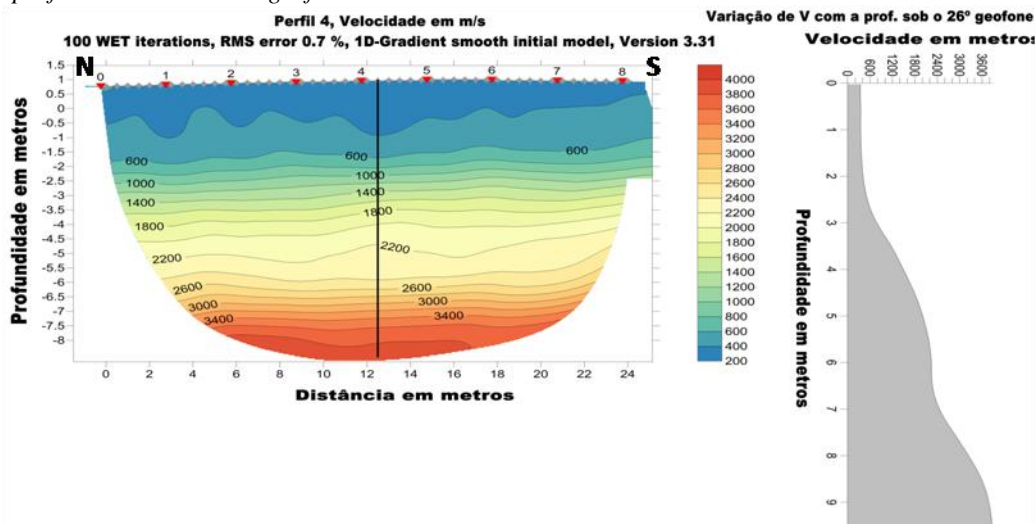


Figura 3.12. 4º Perfil sísmico.

À esquerda: Tomograma com orientação N-S. À direita, variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone.

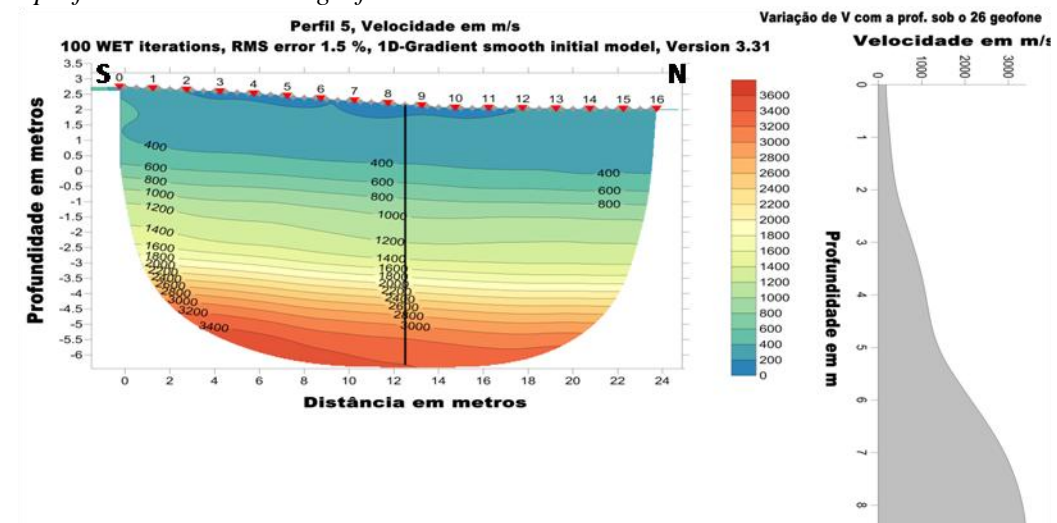


Figura 3.13. 5º Perfil sísmico

À esquerda: Tomograma com orientação N-S. À direita, variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone.

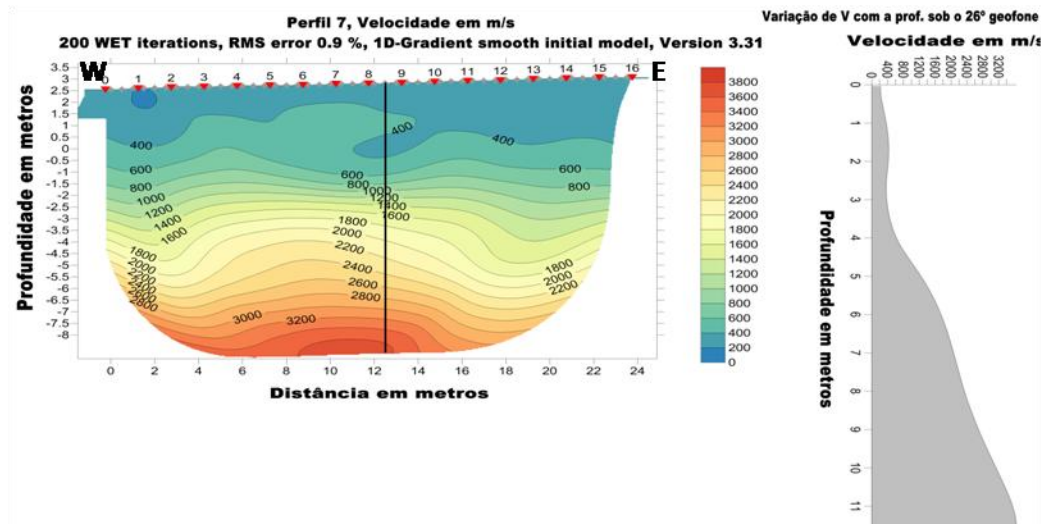


Figura 3.14. 7º Perfil sísmico.

À esquerda: Tomograma com orientação WEB. À direita: variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone.

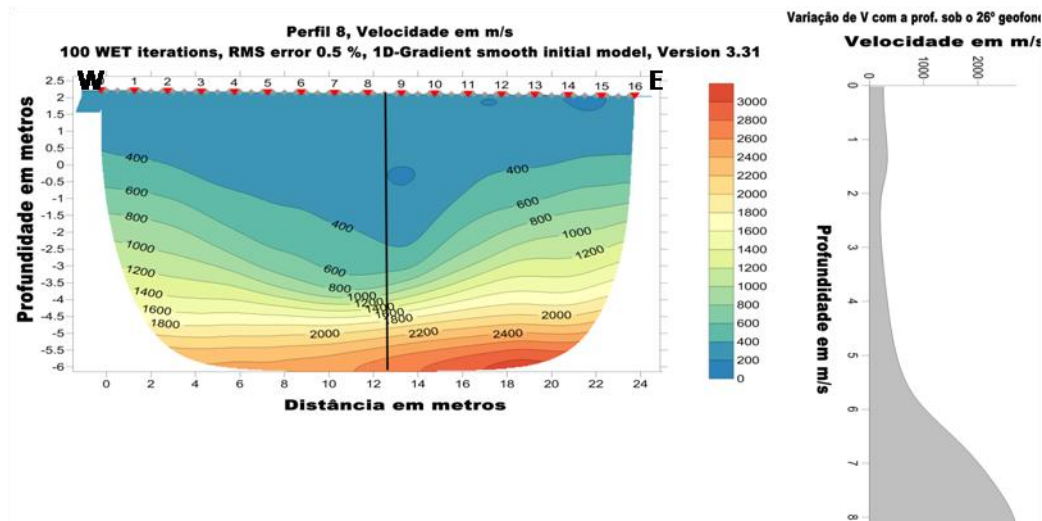


Figura 3.15. 8º Perfil sísmico.

À esquerda: Tomograma com orientação WEB. À direita: variação da velocidade com a profundidade sob o 26º geofone.

3.2.4 Conclusão da análise dos resultados da tomografia sísmica

A sanja feita no sexto perfil permitiu identificar a velocidade correspondente ao nível em que as características da subsuperfície apresentam variações significativas e deverá estar associada ao topo do substrato rochoso, tal corresponde, grosso modo, a 600m/s. Verifica-se em todos os modelos que a partir dos cerca de 600m/s o gradiente de velocidade aumenta, o que permitiu reforçar a ideia de ser este o início do substrato rochoso. Esta velocidade é atingida a profundidades variáveis em cada perfil. A menor profundidade em que foi atingida é de 2.5m no primeiro, quarto, quinto e sexto perfis e a maior é de 4 m no oitavo perfil, sendo 3 m a profundidade em que se atingiu tal velocidade no segundo e terceiro. Apesar de terem sido realizados em locais diferentes, os

modelos de velocidade dos perfis 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam características semelhantes, com profundidades (em que se alcança a velocidade de referência) a variar entre os 2.5 e 3 metros, o que revela que a estrutura no setor A (pelo menos até a profundidades totais atingidas) não varia muito de ponto a ponto. Entretanto o sétimo e oitavo perfis no setor B apresentam diferenças consideráveis, interpretadas como resultantes do processo de assoreamento que se verifica nesta região. Mas por ser um setor menor em relação a setor A pode-se concluir que a informação obtida a partir dos perfis é suficiente para estimar o volume de sedimentos.

A Oeste do setor A (junto a margem do rio São Francisco) não se verificam aluviões à superfície e, para além disso, esta região apresenta cotas ligeiramente superiores. Por estas duas razões ficou de fora dos limites do setor A, ainda que à superfície não se verificassem afloramentos de rochas do Grupo Bambuí (soco). Por outro lado, os perfis sísmicos feitos no bordo Oeste deste setor (perfis 3 e 5) parecem indicar um prolongamento da planície em direção ao rio. Desta forma torna-se difícil estabelecer um limite preciso da planície nesta direção, pelo que se sugere a realização de uma campanha geofísica para determinar a espessura dos sedimentos neste setor (região pintada na figura 3.16)

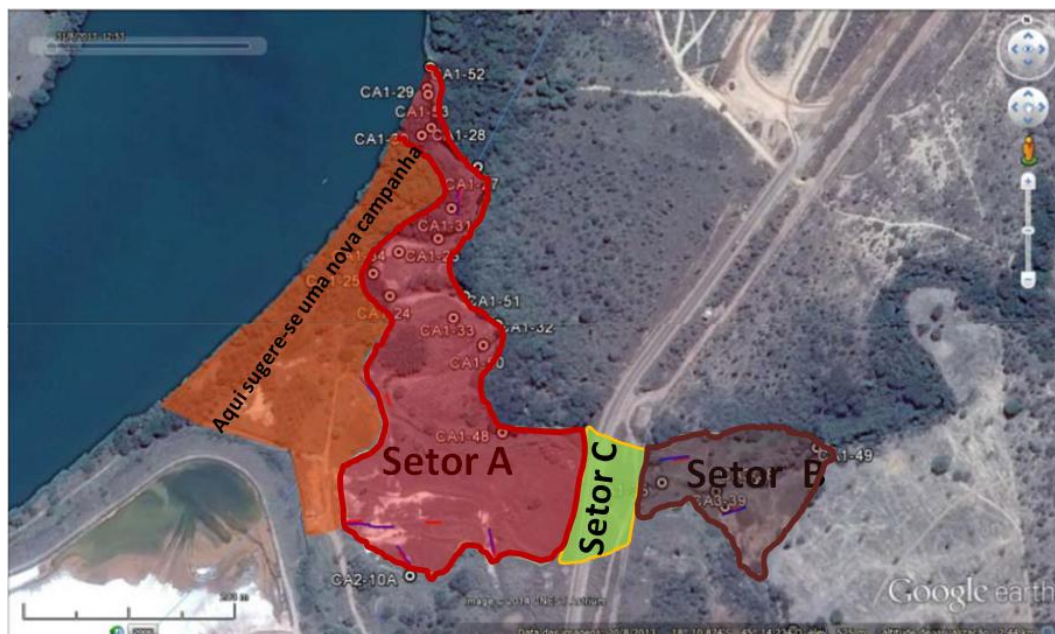


Figura 3.16. Localização da área em que se sugere a realização de uma nova campanha geofísica

As linhas azuis e vermelhas são os perfis sísmicos e elétricos respectivamente; os pontos enumerados são os pontos de amostragem geoquímica; as regiões sombreadas a vermelho, castanho e a verde são os setores A, B e C, respectivamente; a região alaranjada é aquela em que se sugere uma campanha de tomografia sísmica.

3.3 Tomografia elétrica aplicada ao caso concreto

3.3.1 Aquisição dos dados

Uma vez identificado o local e definido o objetivo de uma campanha geofísica, especialmente de resistividade elétrica, surgem as seguintes questões:

- 1- Que técnicas de campo devem ser usadas (1-D, 2-D ou 3-D)?
- 2- Qual é a melhor configuração para tal situação (Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, etc.)?
- 3- Que técnicas de processamento serão usadas (quais os *softwares* mais adequados tendo em conta a técnica a escolher)?

Responder estas questões requer um grande conhecimento a respeito das técnicas de aquisição e processamento, bem como das vantagens e desvantagens das diversas configurações. A seleção da técnica de campo e dos *softwares* a usar depende grandemente dos recursos disponíveis (sobretudo materiais e financeiros), por vezes a técnica de campo escolhida não é a mais adequada para aquela situação, mas é a única disponível. O ideal seria usar uma tomografia 3-D, entretanto, no caso do córrego essa opção é desadequada devido à extensão da área explorada e aos recursos disponíveis. Optou-se pela tomografia 2-D, usando a configuração dipolo-dipolo pois este método, apesar de apresentar uma resolução vertical baixa, possui uma boa resolução horizontal. Acresce que este método tem demonstrado ser muito eficaz em estudos ambientais (Soupios et al., 2006; Metwaly et al., 2012; Elis, et al., 2008; Oliveira, 2009).

A aquisição dos dados da tomografia de resistividade elétrica foi feita na mesma época que os dados da sísmica (Setembro de 2014). Para tal foi usado um resistímetro P.A.S.I. 16G-N de 32 bit, conectado a um Energizer P.A.S.I. P-300T, alimentado por uma bateria de 12Vdc, figura 3.17. Para mais informações cita-se o manual do usuário Electrical Imaging System (2011) da P.A.S.I. como referência.

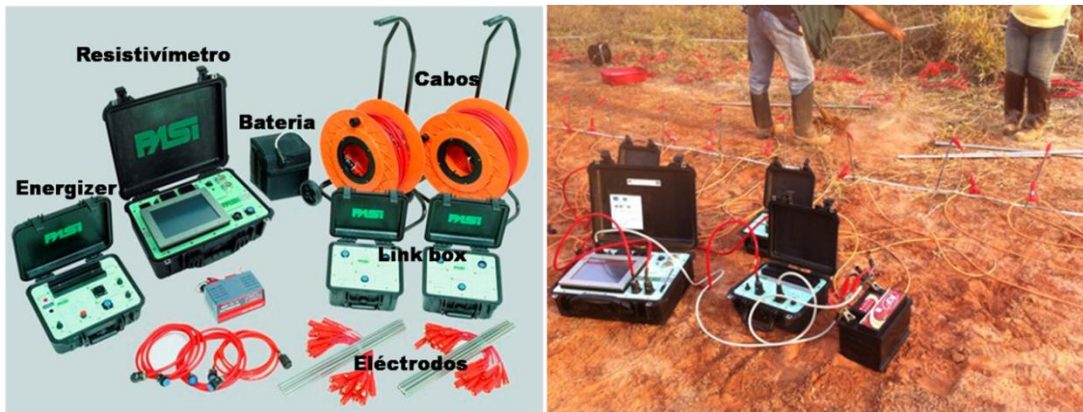


Figura 3.17 Equipamento para o método elétrico

Esquerda: equipamento. Direita: Um dos perfis montado no terreno.

Foram realizados 8 perfis de tomografia de resistividade elétrica usando 32 eléctrodos espaçados de 0.5 metros e todos eles, exceção do perfil 2, localizados próximo dos perfis de sismica (seis no setor A e dois no setor B figura 3.18). A tabela 3.2 apresenta os detalhes acerca dos perfis. Os perfis têm um comprimento de 15.5 m e entre os extremos não se verifica muita diferença de altitude, razão pela qual é irrelevante fazer a correção topográfica.

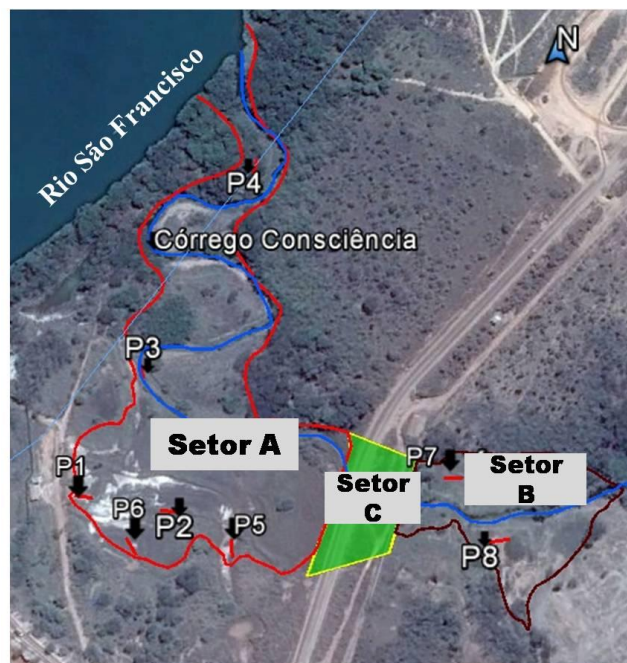


Figura 3.18 Distribuição dos perfis de Elétrica

As linhas vermelhas mais curtas são os perfis. A linha azul localiza o córrego Consciência e as linhas vermelha, castanha e amarela encerram as áreas A, B e C (sombreada a verde), respetivamente.

Perfil	Orientação	Corrente (mA)	Tempo de injeção (s)
1	E-W	150	1
2	W-E	250	1
3	S-N	250	0.5
4	N-S	75	0.5
5	S-N	75	0.5
6	N-S	75	0.5
7	W-E	75	0.5
8	E-W	75	2

Tabela 3.2. Características e parâmetros dos perfis de elétrica

3.3.2 Sequência das medições

Numa configuração dipolo-dipolo começa-se com um espaçamento “**a**” entre os elétrodo de corrente (C1 e C2) e de potencial (P1 e P2). A razão entre o espaçamento entre os pares C1-C2 e P1-P2 e o espaçamento “**a**” é inicialmente igual a unidade, isto é, $n=1$. Na primeira medição os quatro elétrodo C1, C2, P1 e P2 estão localizados nos elétrodo 1,2,3 e 4. Na segunda são ocupados os elétrodo 2,3,4 e 5 e assim sucessivamente até ao fim do perfil, o que é considerado como nível 1. Para um perfil com 32 elétrodo, no nível 1 é possível realizar no máximo 29 medições, isto é $32-(n+2)$. Para o segundo nível “**n**” será igual a “**2**” e é consecutivamente aumentado até a um valor máximo de “**6**”, acima do qual começa-se a perder resolução devido ao enfraquecimento do sinal (Loke, 2001). Assim sendo, para um certo espaçamento “**a**” entre elétrodo consecutivos e um esquema com 32 elétrodo, o número de medições possíveis diminui consecutivamente de 29 (isto é, $32-(n+2)$ para $n=1$) a 24 (isto é $32-(n+2)$ para $n=6$). Para aumentar a profundidade de investigação, aumentou-se o espaçamento entre os elétrodo de corrente (C1 e C2) e de potencial (P1 e P2) de “**a**” para “**2a**” e uma nova série de medições foi iniciada com valores de “**n**” a variar de “**2a**” a “**6x2a**”. Nestas condições e para um esquema com 32 elétrodo o número de medições possíveis diminui consecutivamente de 27, isto é, $32-(2a+2)$ para 24, isto é, $32-(6x2a+2)$.

3.3.3 Processamento

O processamento foi feito obedecendo os seguintes passos:

- Importação dos dados para o *software* RES2DINV ver. 3.59 da Geotomo Software;
- Eliminação das medições “anómalas”;

c) Inversão (escolha do método, definição de parâmetros).

As medições “anômalas” são aquelas que diferem significativamente das medições mais próximas (pontos com resistividade aparente muito maior ou muito menor que a resistividade nos pontos vizinhos, como mostra a figura 3.19). Isto faz com que a diferença entre a resistividade aparente medida e calculada seja grande, provocando instabilidade no processo de inversão. No RES2DINV ver. 3.59 existem várias formas de lidar com esta situação (Loke, 2001). Uma delas consiste em representar os dados (o próprio *software* permite isso) e uma vez identificadas as medições anômalas, elimina-las manualmente.

O *software* RES2DINV ver. 3.59 da Geotomo Software faz a inversão baseando-se no algoritmo de Loke (ver parágrafo 2.3.3). Para tal, divide a subsuperfície em blocos retangulares e o processo de inversão consiste em determinar a resistividade dentro de cada um dos blocos. Uma das grandes vantagens deste *software* é o facto de ter a disposição do utilizador três formas de inversão que podem ser usadas em situação de variação brusca ou suaves de resistividade (ver manual do *software* disponível em <http://www.geotomosoft.com/downloads.php>):

- 1- Por defeito o programa inverte segundo a equação 2.24 (deGroot-Hedlin and Constable, 1990).
- 2- Uma opção é usar a norma L2 (Ellis and Oldenburg 1994a; Loke, 2001). Esta inversão é usada quando se verificam variações suaves de resistividade aparente, fazendo com que a resistividade do modelo varie de forma suave.
- 3- Uma terceira opção da inversão é usar a norma L1 ou inversão robusta (Wolke and Schwetlick 1988; Loke, 2001). Esta inversão é usada quando se verifica variações bruscas de resistividade aparente.

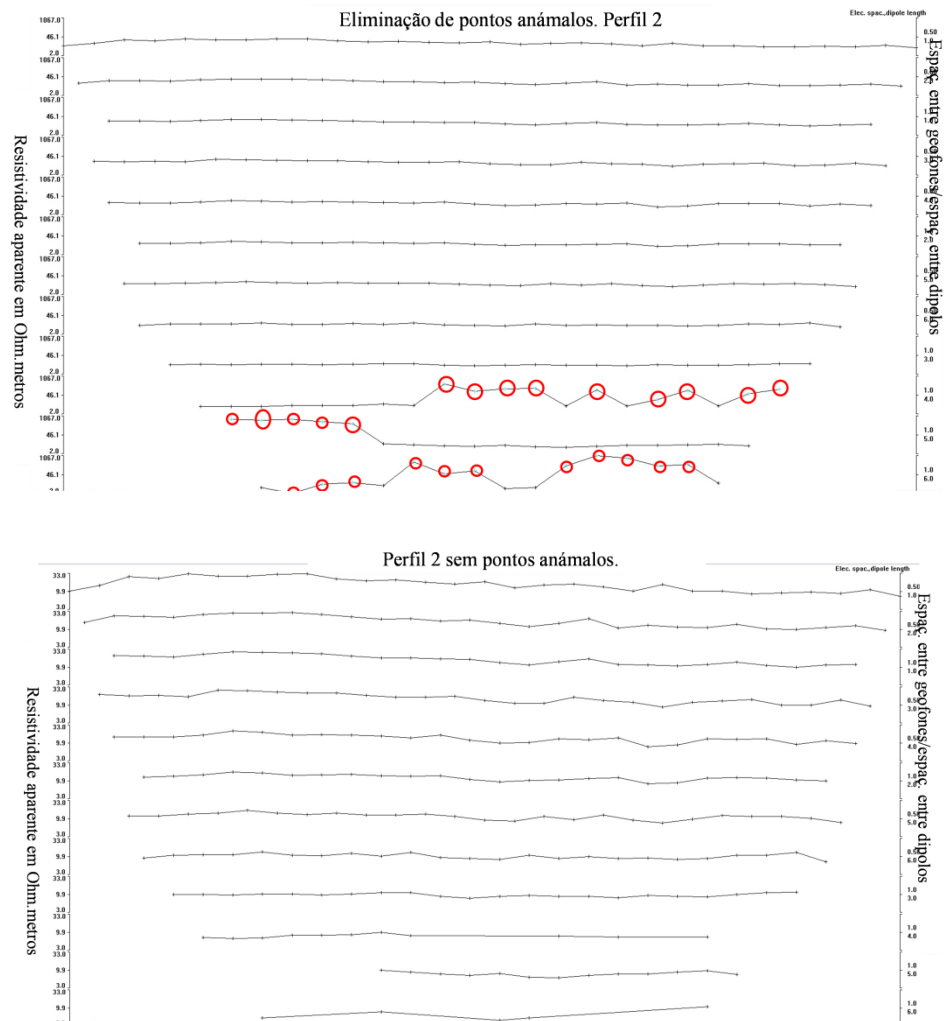


Figura 3.19 Eliminação dos pontos anómalos

Os pontos anómalos estão representados pelos círculos vermelhos (topo). Em baixo estão representados os valores de resistividade a parente do mesmo perfil sem os pontos anómalos.

Como referido no parágrafo 3.1.2 a região adjacente à foz do córrego Consciência apresenta percentagens críticas em metais pesados, e em certas zonas da região verifica-se um assoreamento por processos naturais e antropogénicos. Então pode esperar-se uma das seguintes situações:

- 1- Variação suave da resistividade;
- 2- Contrastes bruscos de resistividade evidenciando zonas caracterizadas por um certo valor, rodeadas por uma outra região com valores bastante diferentes, o que permitiria em cada perfil identificar zonas que indicassem possíveis locais de concentração de poluentes e assim caracterizar sua distribuição espacial por toda a área;

3- Variações bruscas e arbitrárias, de tal forma que se torna difícil estabelecer um padrão da distribuição da resistividade.

Uma apreciação geral dos valores da resistividade aparente obtidos em cada perfil permitiu identificar todas as situações anteriormente descritas, com maior predominância para as duas últimas. Nestas condições é conveniente usar tanto a L_1 -norm inversion (inversão robusta) como a L_2 -norm inversion. Entretanto, neste trabalho optou-se pela primeira por ser aquela que apresentava menor erro.

Foram estabelecidos dois critérios de convergência: 1- com base no RMS relativo entre interações, isto é, o processo de inversão termina se a diferença entre os RMS nas duas últimas interações não fosse inferior a 1, ou 2- o processo termina quando se atingisse um máximo de 9 interações. Para os modelos que tinham RMS inferiores a 10% usou-se o primeiro critério e para aqueles com RMS superiores a 10% usou-se primeiro e o segundo critérios. Por outro lado, todos os modelos que apresentavam um RMS acima dos 50% não foram tidos em conta.

Por defeito o programa usa um fator de suavização λ de 0.16 para a primeira interação e decresce em cerca de metade em cada uma das subseqüentes. Valores muito pequenos podem criar instabilidade ao processo, por isso o programa impõe um valor mínimo de 0.015 (Loke, 2001). Neste processo de inversão os maiores contrastes de resistividade dão-se na primeira interação, por isso é necessário um λ elevado para esta. No presente trabalho, usou-se na primeira interação o valor por defeito (0.16) para alguns perfis e $\lambda=1$ para outros (perfis 4, 6 e 8 por apresentarem maiores contrastes de resistividade). Nas seguintes assumiram-se valores entre 0.15 e 0.03.

3.3.4 Resultados e discussão

Nas figuras de 3.20-3.27 estão representados os modelos de resistividade elétrica obtidos em cada perfil. Importa referir que a escala de cores varia de perfil a perfil, por isso, a análise comparativa entre os diferentes modelos deve ser feita com base nos valores de resistividade. Em cima tem-se a pseudo-secção de resistividade aparente, no meio a equivalente pseudo-secção sintética e em baixo o modelo obtido, isto é, o modelo de resistividades que explica a pseudo-secção do painel central. Os perfis atingem profundidades que variam entre 1.34 metros (na maior parte dos perfis) a 2.75 metros (no perfil 2, que por sinal é o que apresenta menor variação de resistividade e menor RMS, de

2.4%). Os maiores valores de resistividade elétrica verificam-se no quarto perfil (junto a foz do córrego Consciência), enquanto que o maior RMS foi obtido no perfil 8 (100.9%). Como dito no parágrafo anterior, todos os perfis que apresentam RMS acima dos 50% são apresentados, porém não considerados. Assim, o sexto (RMS=58.0%) e oitavo perfis não são considerados. Para o sexto perfil as razões deste elevado erro não foram devidamente identificadas, podem ter várias origens, mas pensa-se que não estão relacionadas com o local, já que este perfil se encontra próximo do primeiro, segundo e quinto que apresentam resultados razoáveis. Já o oitavo perfil foi feito na zona do assoreamento, em que se verifica a presença de objetos, tais como, pedaços de plásticos, arames e outros, que podem influenciar as medições.

A resistividade na parte Sul da área A pode ser caracterizada pelos modelos obtidos nos perfis 1, 2 e 5 (o sexto, figura 3.25, não é considerado tendo em conta que seu erro é acima dos 50%). Nesta região a resistividade varia entre os $1.15\Omega.m$ e $255.3\Omega.m$, verificadas no perfil 1, em que as resistividades mais altas estão acima dos cerca de 30cm de profundidade e a partir dos 5m até ao fim do perfil com orientação E-W (região dentro da linha branca tracejada, figura 3.20). No primeiro perfil pode-se ainda verificar regiões de baixa resistividade distribuídas em diferentes regiões do perfil. O perfil 2 apresenta o menor contraste de resistividade entre $3.80\Omega.m$ e $58.88\Omega.m$, sendo que as resistividades mais altas se encontram numa camada superficial de cerca de 1m (figura 3.21). Abaixo desta encontra-se uma região de baixa resistividade. Para além de ser o único a apresentar esta característica este perfil é o mais profundo. O quinto perfil (figura 3.24) apresenta um contraste de resistividade entre 2.17 e $187.27\Omega.m$ e com uma característica quase semelhante à do segundo; as mais altas resistividades nas camadas superficiais. Pode-se verificar mesmo nas camadas mais profundas o início de uma região de baixas resistividades semelhante àquela que se verifica no perfil 2.

O terceiro perfil (figura 3.22) foi feito a Norte dos perfis citados anteriormente, apresenta uma variação de resistividade com valores mínimos e máximos muito próximos dos valores do quinto perfil. A variação da resistividade é muito arbitrária, apresentando regiões com valores baixos no interior de outras com valores altos, tendo como valores mínimo e máximo 0.66 e $217.42\Omega.m$, respetivamente.

O quarto perfil (figura 3.23) localiza-se mais a Norte do terceiro, junto a foz do córrego. Orientado N-S localiza-se numa região com a resistividade mínima mais elevada

entre todos os perfis, com valores entre os 177.78 e 8988.30 Ω .m, tal que as altas resistividades encontram-se numa camada superficial de cerca de 60cm de espessura.

O sétimo perfil (figura 3.26) foi feito no setor B e apresenta uma variação arbitrária da resistividade, com valores entre os 3.23 e 1089.70 Ω .m. Com resistividades que variam entre os 0.09 e 5746.00 Ω .m, o oitavo perfil (figura 3.27) não foi considerado por apresentar um erro de 100%. As heterogeneidades verificadas a superfície, bem como o processo de assoreamento a que está sujeita aquela região devem estar na base do elevado erro associado ao modelo obtido.

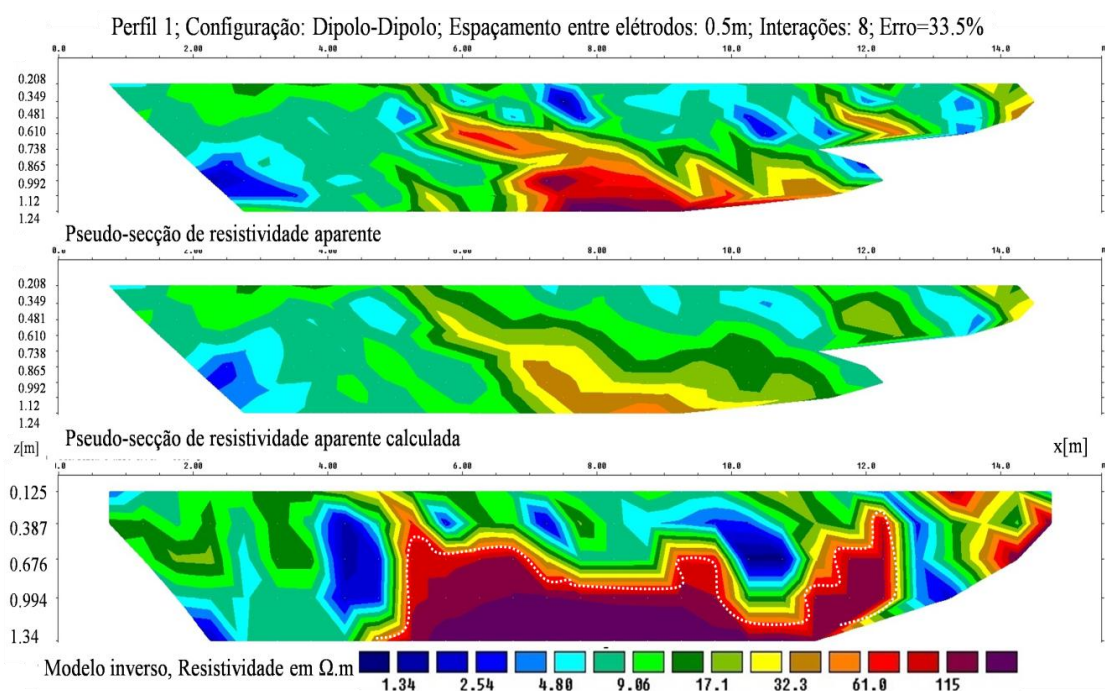


Figura 3.20. Perfil 1 de tomografia elétrica.

Orientação E-W e resistividades a variarem entre os 1.15 Ω .m aos 255.3 Ω .m. A linha branca mostra a região de maior resistividade elétrica.

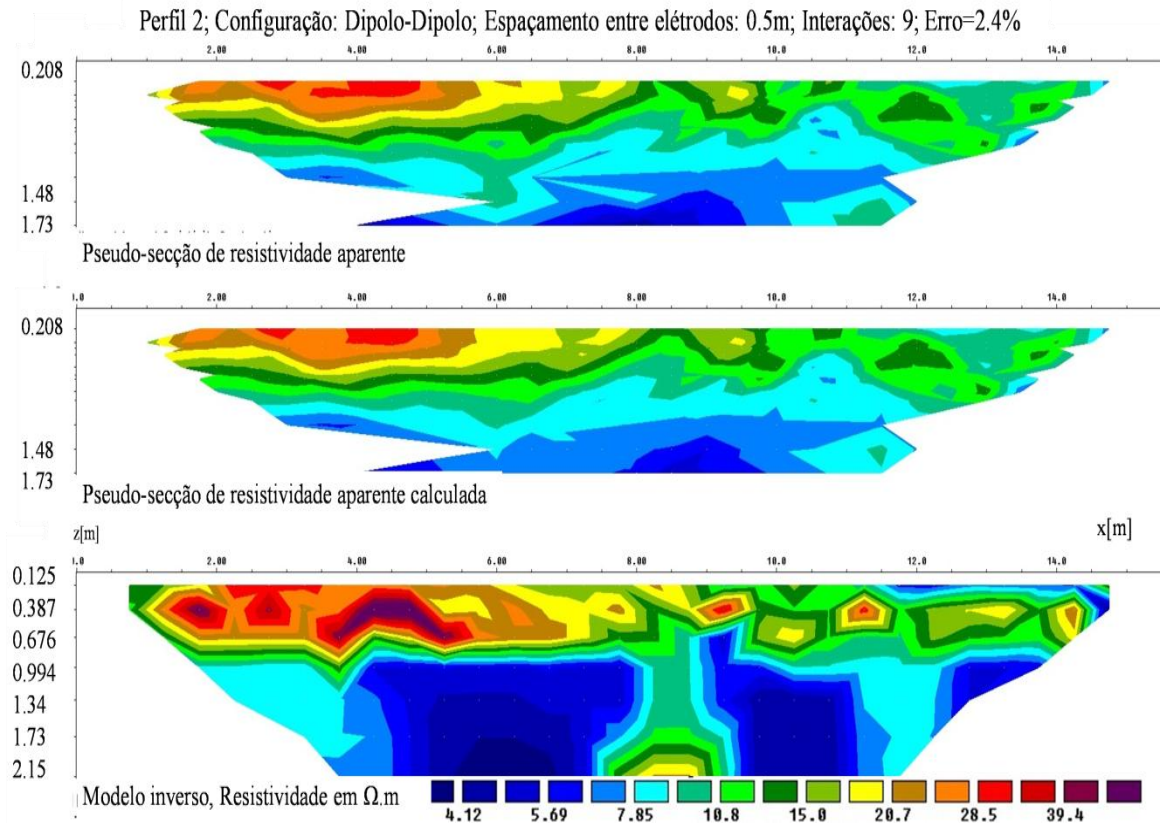


Figura 3.21. Perfil 2 de tomografia elétrica

Orientado W-E é o mais profundo e o que apresenta menor erro e menor contraste de resistividade $3.80\Omega.m$ e $58.88\Omega.m$.

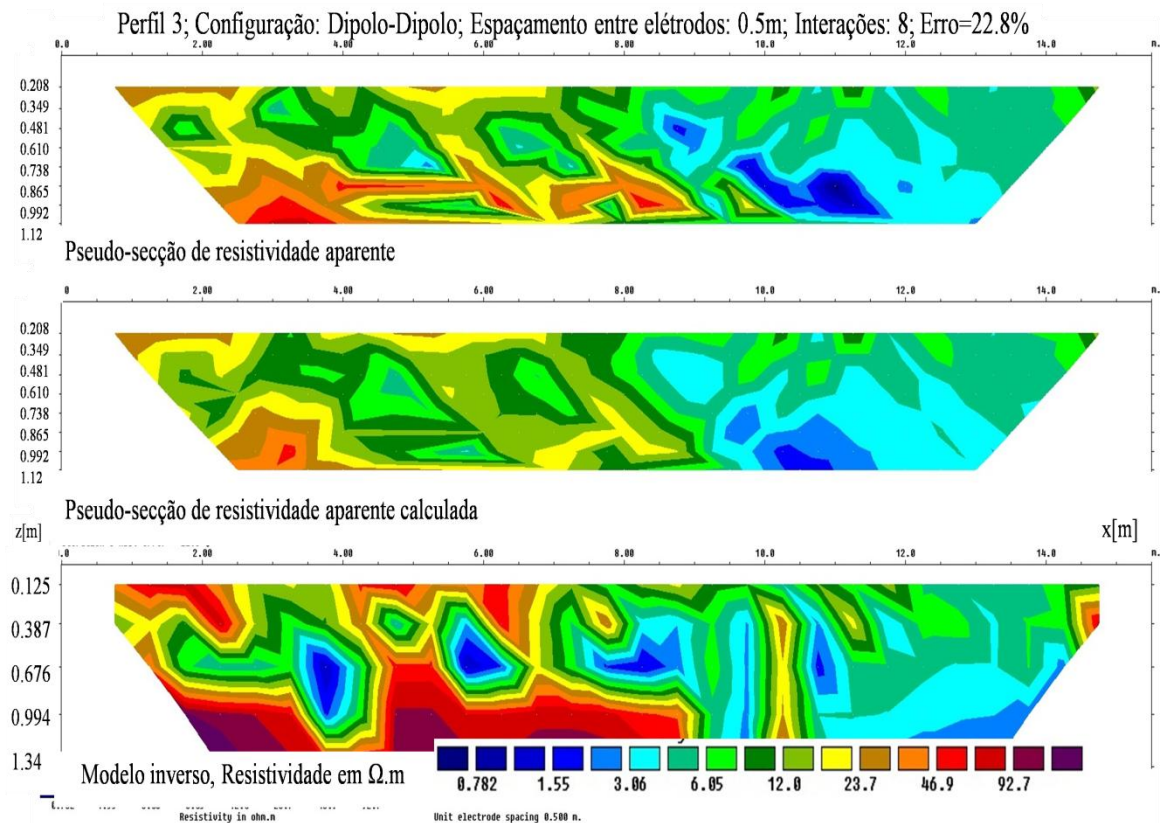


Figura 3.22. Perfil 3 de tomografia elétrica

Orientado S-N e com variação de resistividade entre 0.66 e $217.42\Omega.m$.

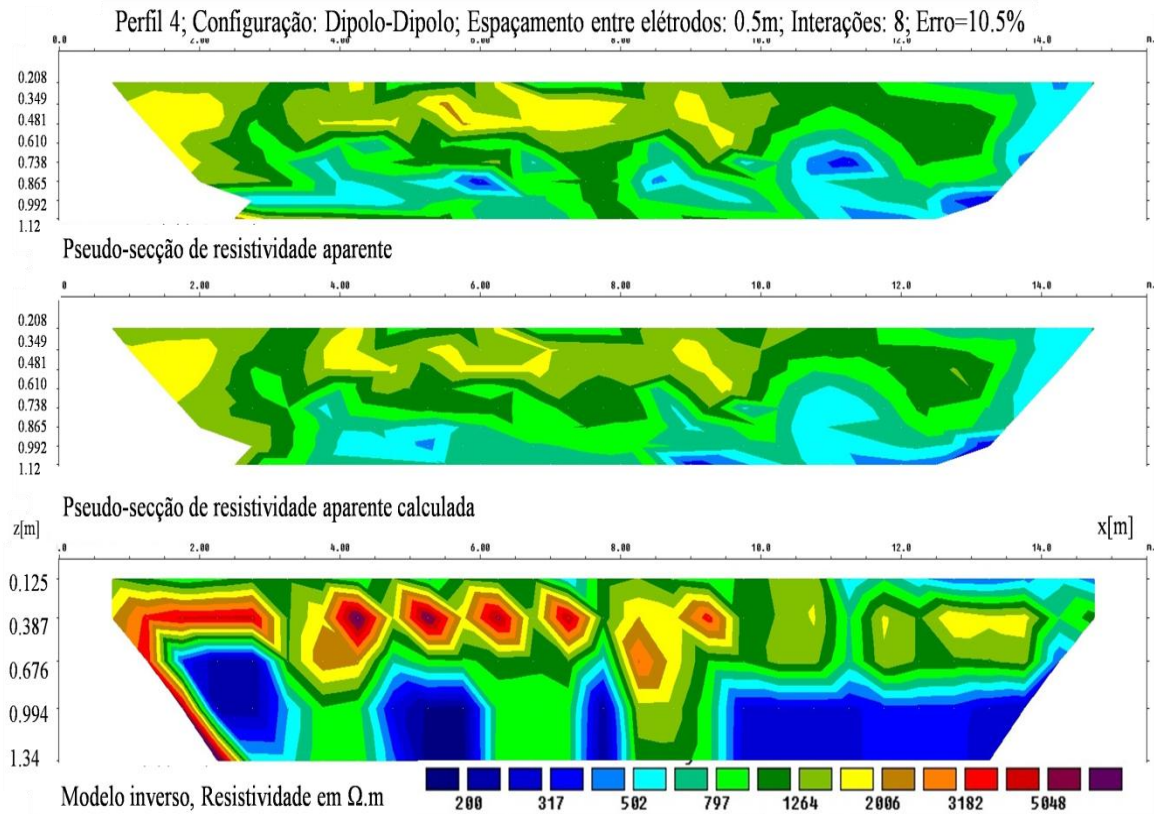


Figura 3.23. Perfil 4 de tomografia elétrica.

Orientado N-S e com resistividade a variar entre 177.78 e 8988.30 $\Omega.m$.

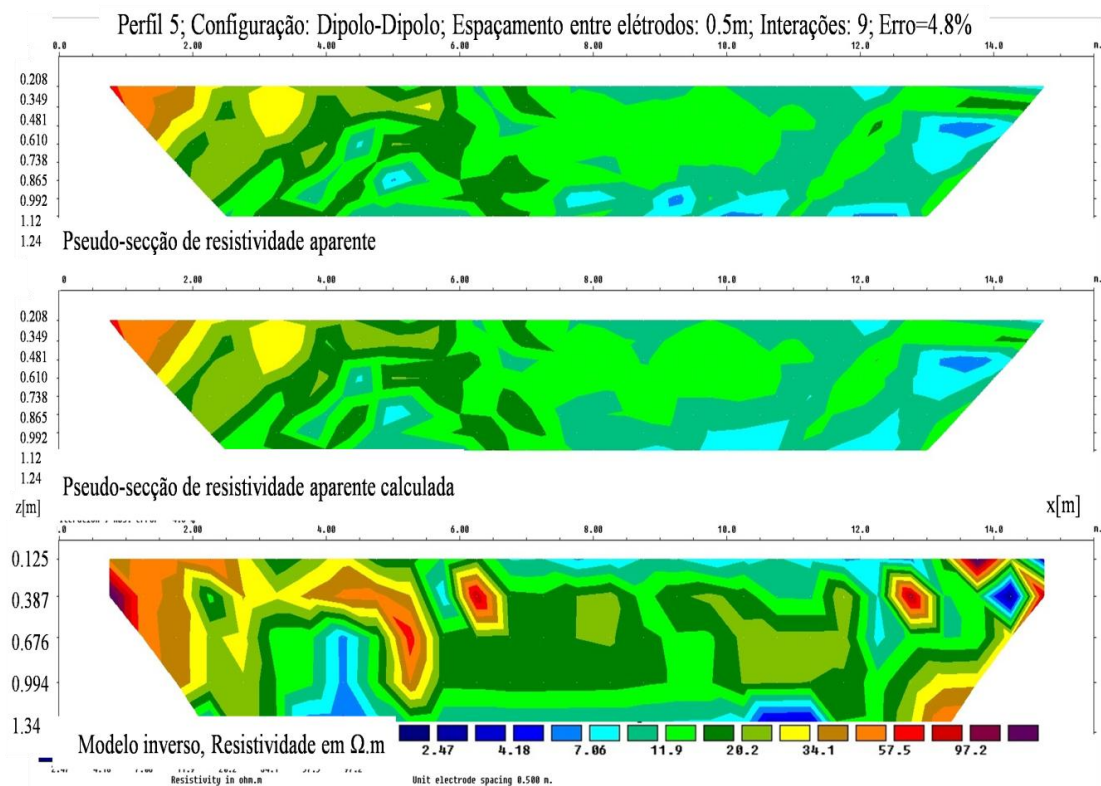


Figura 3.24. Perfil 5 de tomografia elétrica

Orientado S-N apresenta um padrão variação da resistividade em que as altas resistividades verificam-se na camada mais superficial e vê-se o início de uma camada menos resistiva em profundidade. A resistividade varia entre 2.17-187.27 $\Omega.m$.

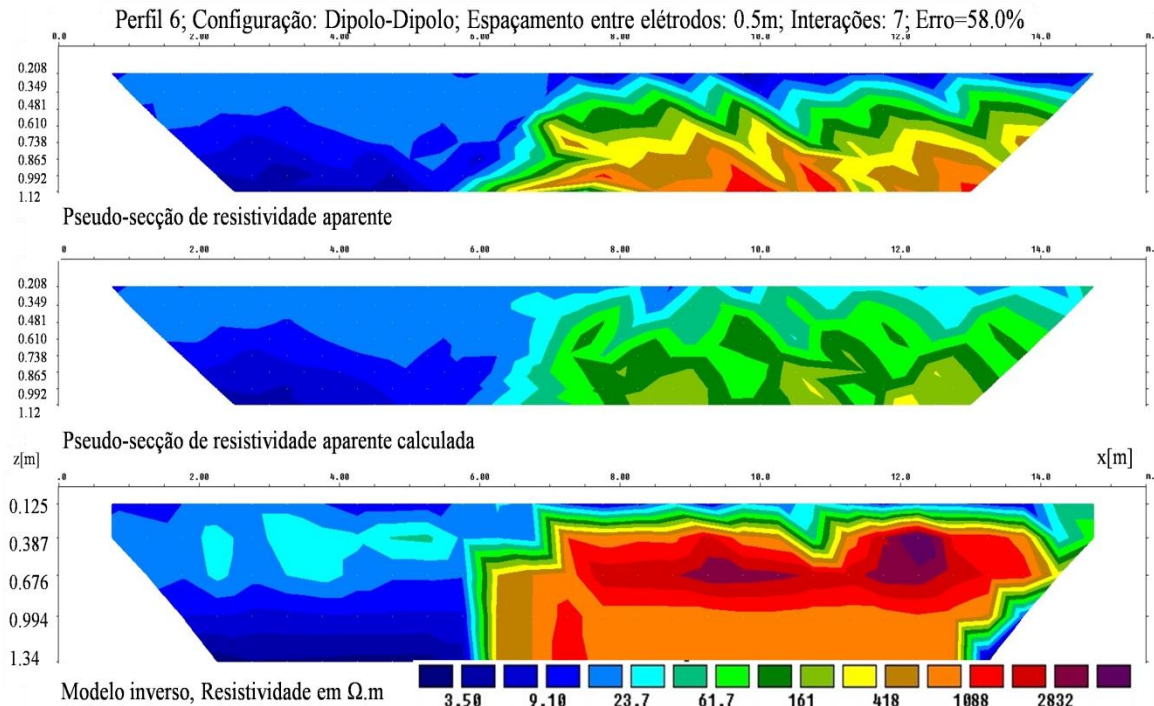


Figura 3.25. Perfil 6 de tomografia elétrica.

Orientado N-S e com resistividades a variar entre 2.75 e 9363.20 $\Omega.m$. Por apresentar um erro acima dos 50% não foi tido em conta.

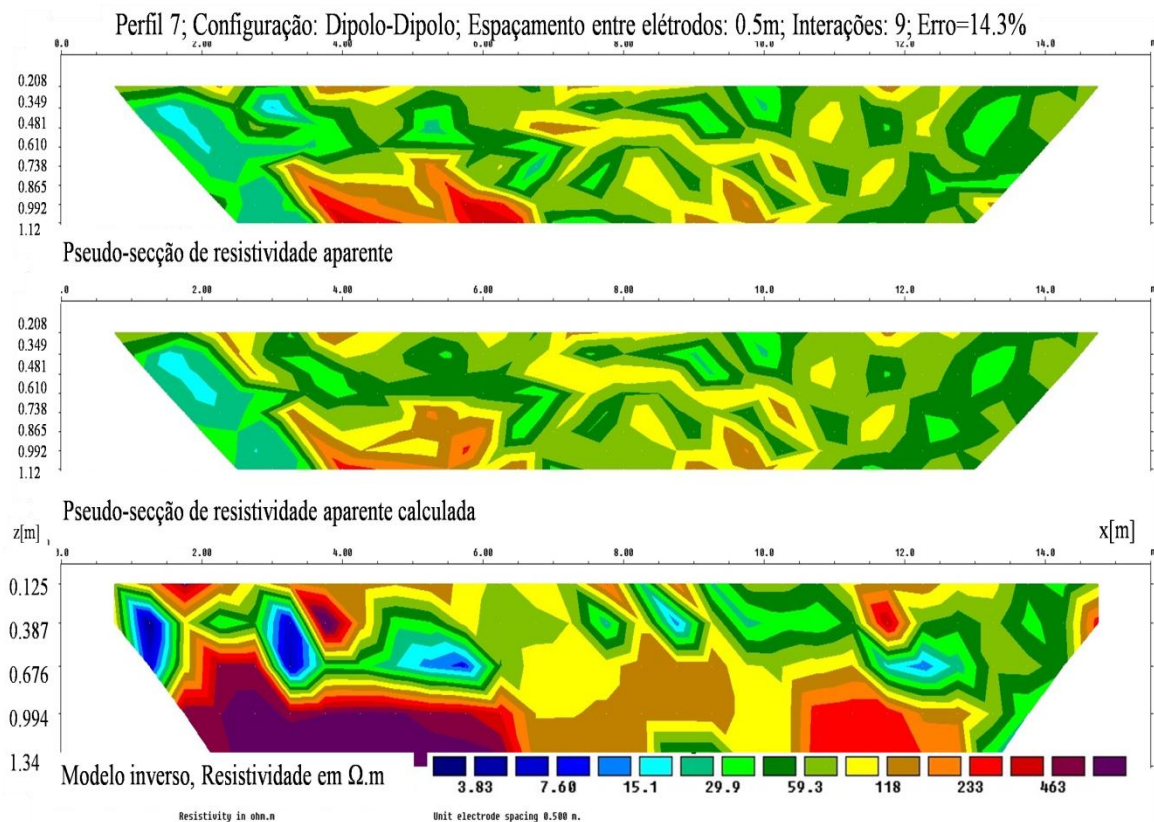


Figura 3.26. Perfil 7 de tomografia elétrica

Orientado W-E e com resistividades a variar de 3.23 a 1089.70 $\Omega.m$.

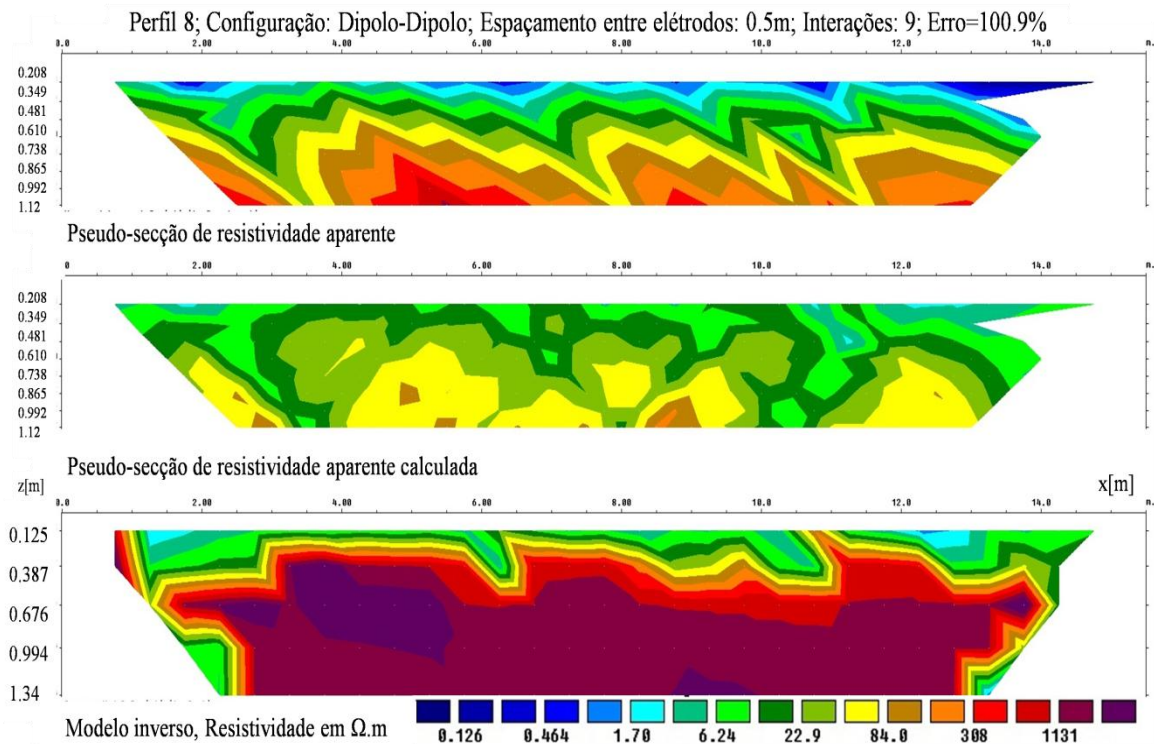


Figura 3.27. Perfil 8 de tomografia elétrica

Orientado E-W e com resistividades que variam entre os 0.09 e 5746.00 $\Omega.m$. Por apresentar um erro acima dos 50% não foi tido em conta.

Os modelos apresentam diferenças consideráveis entre si, mesmo aqueles que foram feitos em zonas próximas (por exemplo, os perfis 1, 2, 5 e 6). Isto leva a concluir que está-se em presença de uma região heterogénea sob o ponto de vista da resistividade dos seus materiais. Contudo, os valores enquadram-se entre os valores típicos para os aluviões e argilas (tabela 3.1).

Para facilitar a análise dos resultados obtidos nos perfis, consideraram-se cinco profundidades (em centímetros 20, 40, 60, 80, 100), para as quais se calcularam os valores médios de resistividade, isto é, para cada perfil extraiu-se a informação, em profundidade, da resistividade média entre todos os pontos do perfil a essa profundidade. Esses valores estão mostrados na tabela 3.3, onde se pode verificar que o 1º, 2º, 3º e 5º perfis apresentam valores de resistividades média muito próximos até a profundidade de 40 cm, diferenças começam a ser observadas a partir dos 60 cm. O 4º e o 7º perfis apresentam valores muito elevados diferentes dos quatro perfis anteriores. A diminuição da resistividade no quarto perfil (apesar do aumento entre os 40 e 60 cm) pode estar relacionada com o nível freático, já que este se encontra próximo não só do córrego mas também do rio São Francisco.

Prof. em cm	Resistividade média ($\Omega.m$)						
	Perf1	Perf2	Perf3	Perf4	Perf5	Perf7	
20	17.51	19.50	20.50	1542	27.05	115.24	
40	22.85	22.61	15.24	2118	28.68	105.18	
60	36.34	19.82	12.21	1702	23.67	113.98	
80	56.39	13.66	23.56	1057	20.42	196.37	
100	86.49	8.4	45.80	740.7	17.73	320.79	

Tabela 3.3 Valores médios de resistividade

Os perfis 6 e 9 foram deixados de fora propositadamente por apresentarem RMS superiores ao limite adotado neste trabalho. Detalhes consultar texto.

3.3.5 Conclusão da análise dos resultados da tomografia elétrica

Uma vez tratar-se de contaminação por metais, se a contaminação estivesse concentrada em regiões específicas relativamente largas (por exemplo, plumas de contaminação), tais regiões seriam caracterizadas por baixa resistividade e, portanto, alta condutividade elétrica. Nos resultados da tomografia elétrica crê-se não terem sido identificadas plumas, pelo que, se pode concluir que a contaminação ocorre de forma muito dispersa e pontual, não existindo largas regiões de maior ou menor concentração de contaminantes. As variações bruscas e arbitrárias na resistividade elétrica, principalmente as descontinuidades laterais que se notam na maioria dos perfis, pode ser explicada pelo facto de haver na região zonas muito pontuais de maior ou menor concentração de contaminantes condutivos, como metais pesados, mas também variações na concentração de aluviões e de argilas (principalmente notadas pelas variações verticais), o que pode levar a contrastes de resistividade arbitrários, tais como os que se verificam nos resultados obtidos.

As altas resistividades no sétimo perfil podem estar relacionadas com o facto de se tratar de uma região assoreada em que os sedimentos estão poucos compactados, podendo estarem preenchidos por fluidos, especificamente o ar cuja resistividade é muito elevada. Refere-se ainda que o levantamento dos dados foi feito em época seca e neste setor o solo estava tão seco que foi necessário colocar água nos eléctrodos para permitir uma melhor circulação da corrente elétrica. Resultados diferentes poderiam ser obtidos em época

chuvosa, pois a resistividade do solo varia significativamente com o nível de saturação, como demonstra a lei de Archie

4-ESTIMATIVA DO VOLUME

4 Estimativa do Volume

4.1 Procedimento

A partir do modelo digital obtiveram-se as coordenadas (latitude, longitude e altitude) dos contornos, bem como os pontos ao longo de toda a superfície interior de cada setor. Gerou-se malhas igualmente espaçadas, em que cada par (latitude, longitude) corresponde a uma cota (altitude), dito de outra forma, a cada nodo (x,y) corresponde uma cota (z). Isto permitiu representar as topografias das camadas superficiais livres, denominadas superfícies A, B e C para os três setores, respetivamente. Os perfis sísmicos alcançaram a base dos aluviões a profundidades diferentes. Para o setor A os perfis mais profundos foram o 1º e o 3º (profundidade máxima de 3m) e nos demais, a base foi alcançada a cerca de 2.5m. Considerando estas profundidades (mínima e máxima) foram criadas superfícies paralelas à superfície livre “A”, denominadas “2.5A” e “3A”, isto é, à cada ponto da superfície livre “A” subtraiu-se 2.5 e 3 metros, respetivamente. Estas superfícies encontram-se representadas na figura 4.1.

No setor B o 8º perfil alcançou a base dos sedimentos a cerca de 4 metros, ao passo que o 7º perfil a 3 metros. Analogamente foram criadas as superfícies “3B” e “4B”, paralelas a “B” (figura 4.2)

O setor C ocupa uma faixa estreita entre os setores A e B. Portanto, do lado Oeste do setor C a profundidade dos sedimentos é igual aquela registada no setor A (que varia de 2.5 a 3 metros) e do lado Este é igual a profundidade registada no setor B (que varia de 3 a 4 metros). Desta forma obtiveram-se as superfícies “C”, “3C” e “4C”, correspondendo a superfície da camada superior livre, superfície aos 3 metros e a 4 metros, respetivamente, sendo as duas últimas paralelas a primeira e geradas de forma semelhante as “3A” e “4B” dos setores “A” e “B”, respetivamente, representadas na figura 4.3.

As linhas sobre as superfícies são cortes, em que C abrevia a palavra “corte” e os números representam a ordem segundo cada direção. Notar que em cada superfície as linhas dos cortes têm cores diferentes, isto para ir de encontro com as representações gráficas nas figuras 4.4-4.6.

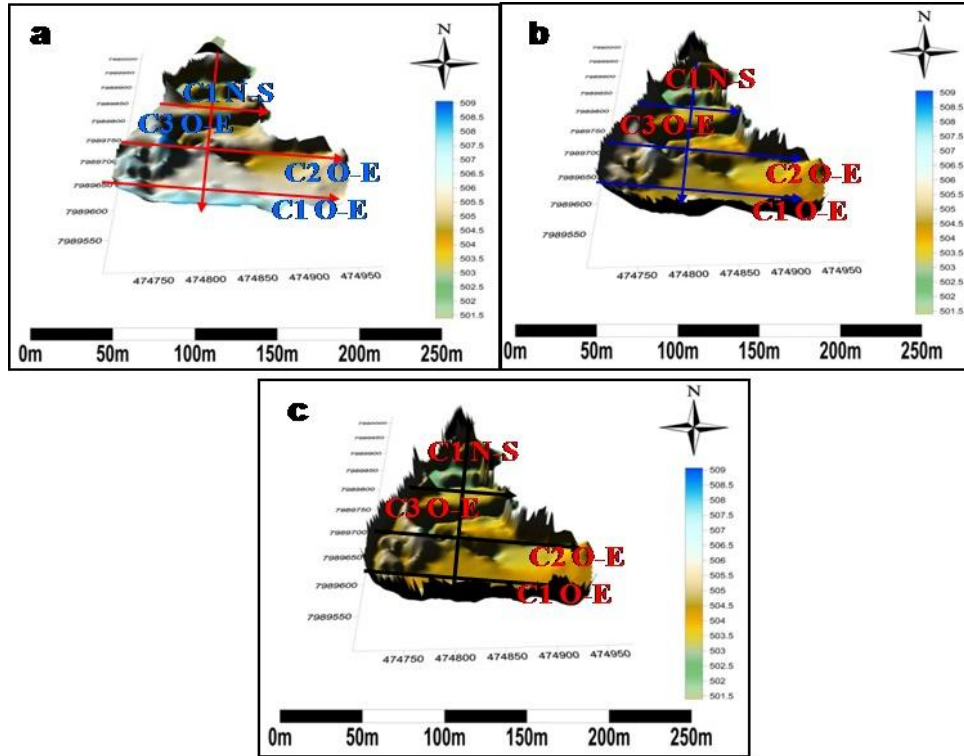


Figura 4.1 Superfícies consideradas para a estimativa do volume do setor A
Superfície superior “A” (a). Superfície “2.5A” (b). Superfície “3A” (c). São 250 metros na direção E-O na região mais larga e 500 metros na direção N-S na região mais comprida. A depressão que se verifica em forma de “S” é o córrego Consciência, com a sua foz a Norte.

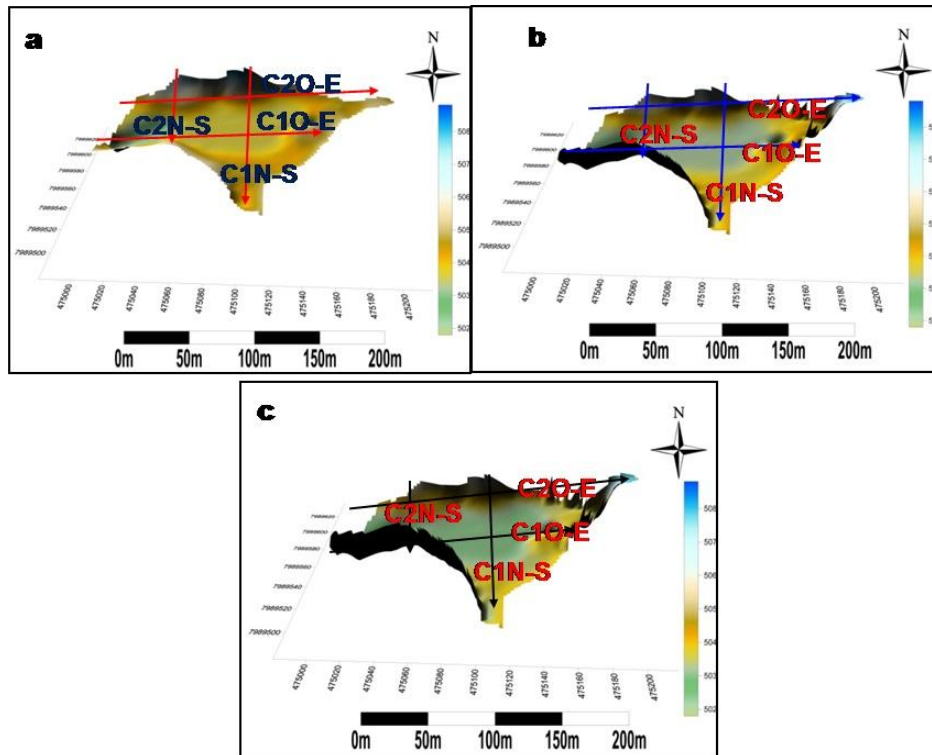


Figura 4.2. Superfícies consideradas para a estimativa do volume do setor B
Superfície superior “B” (a). Superfície “3B” (b). Superfície “4B” (c). São 175 metros na direção Este na região mais larga e 145 metros na direção Norte na região mais comprida.

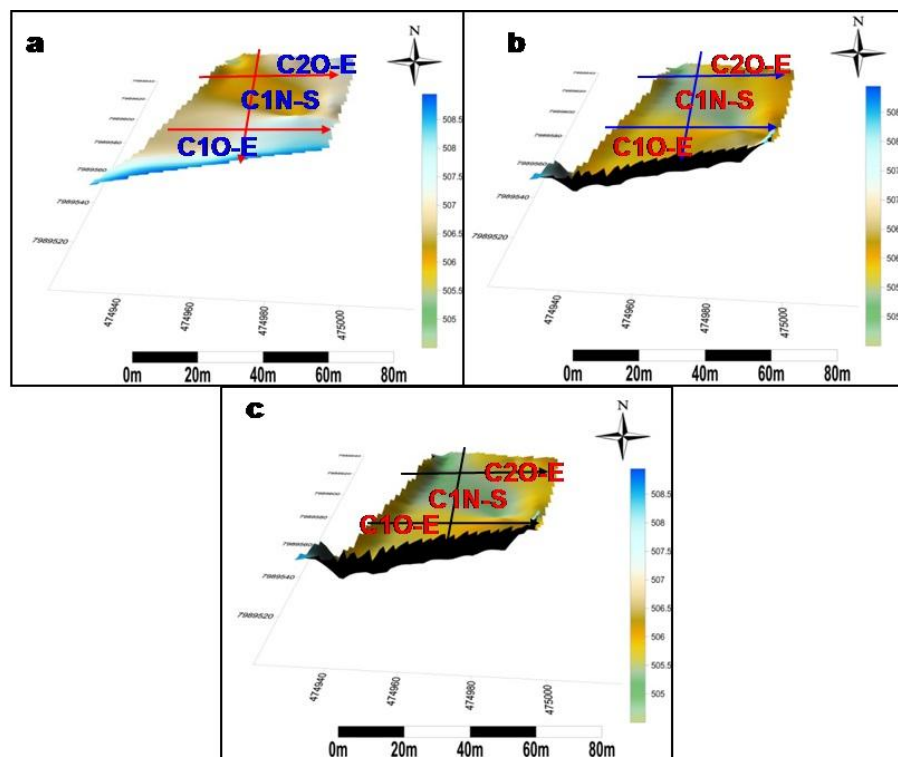


Figura 4.3. Superfícies consideradas para a estimativa do volume da área C
 Superfície superior “C” (a). Superfície “3C” (b). Superfície “4C” (c). São cerca de 125 metros na direção Norte na região mais larga e 60 metros na direção Este na região mais larga

As três superfícies geradas em cada setor serviram de limites para a estimativa do volume por defeito e por excesso. O limite por defeito é calculado entre a superfície livre e a superfície mínima (base considerando a profundidade mínima) e o volume por excesso é calculado entre a superfície livre e a superfície máxima (base considerando a profundidade máxima). Por exemplo, para o setor A o volume por defeito (VA1) é calculado entre as superfícies “A” e “2.5A” ao passo que o volume por excesso é calculado entre as superfícies “A” e “3A”. Analogamente calculou-se VB1, VB2, VC1 e VC2 para os setores B e C, respetivamente.

Para mostrar a variação da elevação em função da distância segundo certa direção, nas superfícies representadas nas figuras 4.1-4.3 foram feitos cortes; para o setor A, um segundo a direção N-S e três segundo O-E. A representação gráfica da profundidade das camadas ao longo destes cortes é feita na figura 4.4. Para o setor B, foram feitos dois na direção N-S e dois na direção O-E, representados na figura 4.5. No setor C, foram feitos apenas três, dois na direção O-E e um na direção N-S, representados na figura 4.6. Para além de se analisar a elevação segundo a direção dos perfis, os cortes permitiram visualizar de forma bidimensional as superfícies limites consideradas no cálculo do

volume. Em cada gráfico as linhas vermelhas representam os cortes feitos na superfície livre, as azuis na superfície mínima e as pretas na superfície máxima e, é também com estas cores que as linhas foram representadas nas figuras 4.4-4.6. Por exemplo, para o setor A, o volume VA1 é estimado entre as linhas vermelha e azul e VA2 entre as linhas vermelha e preta, nos outros setores procedeu-se de forma análoga.

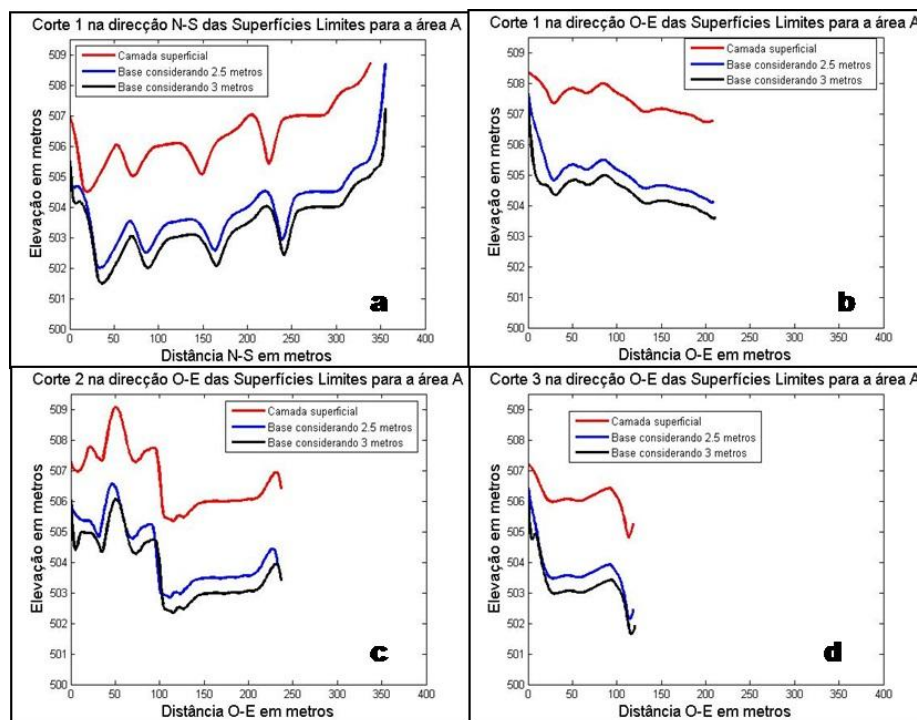


Figura 4.4 Cortes nas superfícies do setor A

Em cada figura estão representadas os cortes feitos nas três superfícies. As cores vermelha, azul e preta das linhas em cada gráfico denotam os cortes nas superfícies “A”, “2.5A” e “3A”, respetivamente. a) C1N-S; b) C1O-E; c) C2O-E; d) C3O-E.

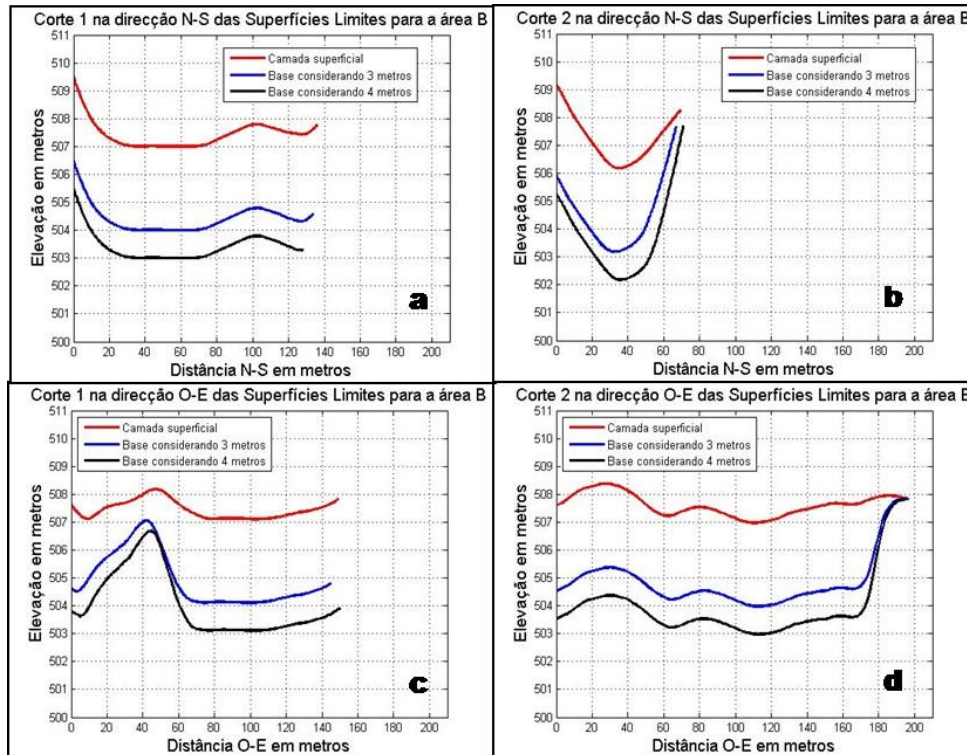


Figura 4.5. Cortes nas superfícies do setor B

Cortes feitos nas três superfícies. “B”, “3B” e “4B”, respectivamente. a) C1N-S; b) C2O-E; c) C1O-E; d) C2O-E.

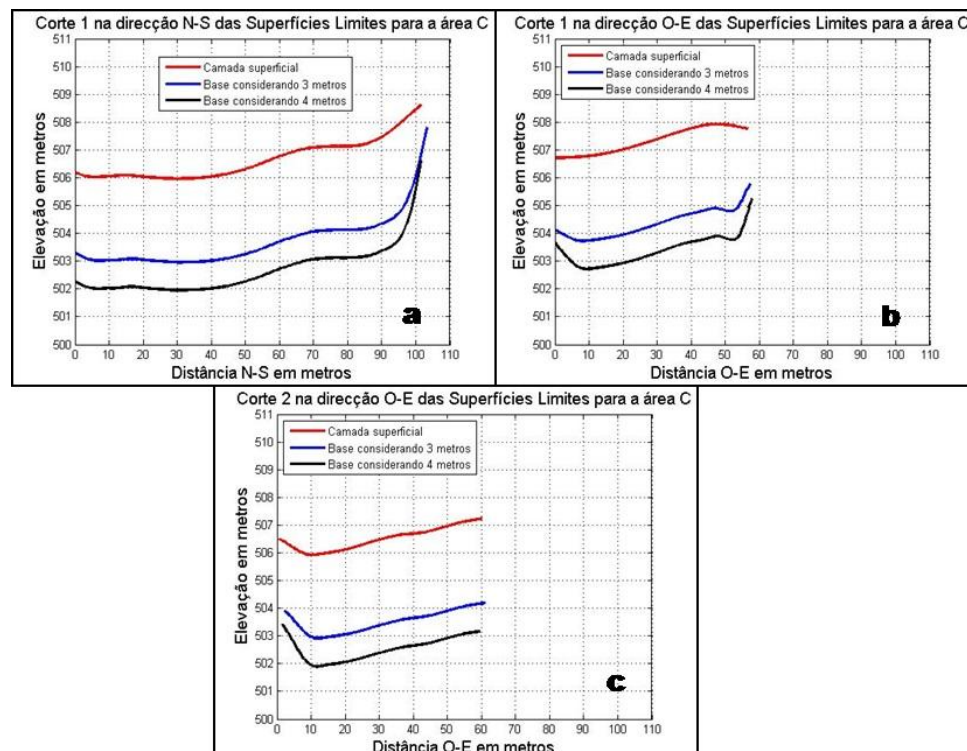


Figura 4.6. Cortes nas superfícies do setor B

Em cada figura estão representadas os cortes feitos nas três superfícies, “3B” e “4B”. a) C1N-S; b) C1O-E; c) C2O-E;

4.2 Volume e Incerteza relativa

Para funções tridimensionais o volume é dado pelo integral (Press et al., 1988):

$$I = \int_{x_{min}}^{x_{max}} dx \int_{y_{min}(x)}^{y_{max}(x)} dy \int_{z_{min}(x,y)}^{z_{max}(x,y)} f(x,y,z) dz \quad \text{Eq. 4.1}$$

Seja

$$G(x,y) = \int_{z_{min}(x,y)}^{z_{max}(x,y)} f(x,y,z) dz \quad \text{Eq. 4.2}$$

E

$$H(x) = \int_{y_{min}(x)}^{y_{max}(x)} G(x,y) dy \quad \text{Eq. 4.3}$$

Então,

$$I = \int_{x_{min}}^{x_{max}} H(x) dx \quad \text{Eq. 4.4}$$

Ou seja, conhecendo a função $G(x,y)$ (isto é, o valor de z em cada nodo) pode-se integrar ao longo de Y para obter a função $H(x)$, que integrada ao longo de X dá o volume pretendido.

A resolução das integrais 4.1-4.4 pode ser feita recorrendo a métodos numéricos, tais como a regra de Trapézios, a regra 1/3 e 3/8 de Simpson. Neste trabalho opta-se pela última.

Seja n o número de pontos com espaçamento h , numericamente o integral 4.4 pode ser resolvida por meio da fórmula de 3/8 de Simpson (Press et al., 1988; Chapra and Canale, 2008):

$$I = \frac{h}{2} [H(x_0) + 3 \sum_{i=t+2}^{n-1} [H(x_i) + H(x_{i+1})] + 2 \sum_{j=3t}^{n-2} [H(x_j) + H(x_n)]] \quad \text{Eq. 4.5}$$

Em que h é o espaçamento entre os sucessivos pontos e $t=1,2,3,4,\dots$. Notar que o primeiro somatório da equação 4.6 tem coeficiente 3, o segundo tem coeficiente 2 e os extremos têm coeficiente 1.

Seja $i=1,2,3,\dots,n$ o número de linhas e $j=1,2,3,\dots,m$ o número de colunas da malha regular com espaçamento Δx entre colunas e Δy entre linhas, tal que $\Delta x = x(j+1) - x(j)$ e $\Delta y = y(i+1) - y(i)$. No Surfer12 o volume é dado pela resolução numérica da equação 4.4, tal como mostrado na equação de 4.5:

$$H(i) = \frac{3\Delta x}{8} [G_{i,1} + 3G_{i,2} + 3G_{i,3} + 2G_{i,4} + \dots + 2G_{i,m-1} + G_{i,m}] \quad \text{Eq. 4.6}$$

$$Volume = \frac{3\Delta y}{8} [H_1 + 3H_2 + 3H_3 + 2H_4 + \dots + 2H_{m-1} + H_m] \quad \text{Eq. 4.7}$$

Em que $G(i,j)$ é o valor da função na linha i e coluna j , ou seja, $G(i,j)$ é o valor da cota z no nodo (x,y) e os coeficientes seguem o padrão: $\{1,3,3,2,3,3,2,\dots,3,3,2,1\}$.

Foi desta forma que se obtiveram os volumes para cada setor, considerando-se os volumes por defeito e por excesso e depois, a média aritmética entre estes dois últimos. O volume final considerado é igual ao valor médio com uma margem de erro igual ao erro relativo.

Setor A

Por defeito (VA1)

Volume por defeito, calculado entre a superfície livre e a superfície a profundidade de 2.5 metros é de $VA1=139206.5 \text{ m}^3 \approx 139 \times 10^3 \text{ m}^3$

Por excesso (VA2)

Volume por excesso, calculado entre a superfície livre e a superfície a profundidade de 3 metros é de $VA2=171717.7 \text{ m}^3 \approx 172 \times 10^3 \text{ m}^3$

Desta forma o volume é igual ao valor médio de VA1 e VA2, isto é:

$$V_m = \frac{VA1 + VA2}{2} = \frac{139 \times 10^3 + 172 \times 10^3}{2} = 155.5 \times 10^3$$

$$V_m \approx 155.5 \times 10^3 \text{ m}^3$$

O erro relativo será:

$$E_r = \frac{|VA1 - V_m|}{V_m} \times 100\% = 10.6\%$$

Portanto, o volume no setor A é $VA=155.5 \times 10^3 \text{ m}^3 \pm 16.5 \times 10^3 \text{ m}^3$

Analogamente obteve-se para os setores B e C os seguintes valores:

Setor B

Por defeito: $VB1=45253.1\text{ m}^3 \approx 45 \times 10^3 \text{ m}^3$

Por excesso: $VB2=60337.4 \text{ m}^3 \approx 60 \times 10^3 \text{ m}^3$

Valor médio: $V_m \approx 52.5 \times 10^3 \text{ m}^3$

Erro relativo: 14.3%

Volume no setor B: $VB=52.5 \times 10^3 \text{ m}^3 \pm 7.5 \times 10^3 \text{ m}^3$

Setor C

Por defeito: $VC1=17464.7\text{ m}^3 \approx 18 \times 10^3 \text{ m}^3$

Por Excesso: $VC2=23144.9\text{ m}^3 \approx 23 \times 10^3 \text{ m}^3$

Valor médio: $V_m=20.5 \times 10^3 \text{ m}^3 \approx 21 \times 10^3 \text{ m}^3$

Erro relativo: 12.2%

Volume no setor C: $VC=21 \times 10^3 \text{ m}^3 \pm 3 \times 10^3 \text{ m}^3$

4.3 Conclusão

Como se pode observar na figura 3.5 os perfis sísmico não cobrem toda área de estudo, mas a forma como foram distribuídos permitiu obter informações de diferentes pontos, fazendo com que tais informações fossem consideradas representativas para cada área.

O setor C é uma pequena faixa entre as setores A e B. Por isso nos extremos considerou-se a profundidade da área de fronteira, isto é, no lado do setor A considerou-se a profundidade máxima desta e no lado oposto tomou-se a profundidade do setor B. Desta forma, a profundidade mínima de C é a máxima de A e a profundidade máxima de C é a máxima de B. Os pontos no interior foram obtidos por interpolação.

Em resumo:

Volume (m ³)	Setor A	Setor B	Setor C
Por defeito	139x10 ³	45x10 ³	18x10 ³
Por excesso	172x10 ³	60x10 ³	23x10 ³
V médio	155.5x10 ³	52.5x10 ³	20.5x10 ³
Erro relativo	10.6%	14.3%	12.2%
Volume V	155.5x10 ³ ± 16.5x10 ³	52.5x10 ³ ± 7.5x10 ³	20.5x10 ³ ± 2.8x10 ³

Tabela 4.1 Volume de sedimentos estimado para cada setor

Somando os volumes estimados em cada setor obteve-se o volume total de sedimentos que se estima estarem envolvidos na necessidade de remediação, cujo valor é $(228.5 \pm 26.8) \times 10^3 \text{ m}^3$.

5-CONCLUSÕES GERAIS

5 Conclusões Gerais

A região em estudo é caracterizada por depósitos de aluviões e argilas, contaminados por metais pesados. Os principais contaminantes identificados nas análises químicas foram cádmio, zinco, arsénio, cobre e o chumbo. A contaminação acontece de forma dispersa e, em certos casos, pontual resultante da drenagem dominante na região. O setor B é caracterizado por um processo de assoreamento rápido, pelo que a profundidade dos sedimentos é maior que no setor A. Para o processamento dos dados da tomografia sísmica usou-se a técnica WET conforme proposto por Schuster e Bosz (1993) incorporada no *software* Rayfract 3.31 e para a tomografia elétrica 2-D usou-se o algoritmo proposto por Loke e Barker (1995) incorporada no *software* RES2DINV ver. 3.59.

Os testes feitos em modelos sintéticos revelaram o já sabido facto de que a técnica WET introduz um gradiente de velocidade onde tal pode não existir. Mas os testes também revelaram que próximo a zona de transição de velocidades ocorre um aumento do gradiente de velocidades. Sendo assim, torna-se difícil saber com exatidão a localização da interface que separa meios com velocidades diferentes, principalmente em meios onde a velocidade varia gradualmente, como no caso de zonas sedimentares. Então, era necessário considerar um nível de referência (profundidade de referência) e tal foi conseguido graças a análise estratigráfica do material geológico recolhido da sanja aberta junto ao sexto perfil, indicando como referência a profundidade em que se atinge a velocidade de 600m/s, alcançada a profundidades diferentes. Um facto identificado em todos os perfis é que a partir deste nível o gradiente de velocidade aumenta, o que ajudou a reforçar a ideia de ser este o início do soco alterado. Apesar de se tratar de velocidade baixa para ser considerado como um substrato rochoso, importa referir que tal não é o soco, mas o início da transição dos sedimentos para o soco. O padrão das isolinhas de velocidade foi semelhante na maioria dos perfis (linhas quase horizontais), excetuando o primeiro e oitavo em que se verificavam algumas alterações que se relacionam com a topografia. Embora os perfis não tenham coberto toda a área em estudo, a regularidade das observações sugere que, outras subestruturas da região apresentem, grosso modo, a mesma característica dos perfis estudados em condições semelhantes, já que eles estão distribuídos de tal forma que se pudesse obter informações tanto dos bordos como do interior da planície. Contudo também há resultados que parecem mostrar que as condições morfológicas da zona de estudo se estendem a uma área mais extensa onde seria

importante aprofundar o estudo. Por exemplo, o terceiro perfil de tomografia sísmica revelou que a planície aluvionar se estende em direção ao rio São Francisco, pelo que torna-se necessário realizar uma nova campanha sísmica a Oeste do setor A com vista a determinar a espessura de sedimentos nesta zona. Este resultado acrescenta valor às informações obtidas a partir dos perfis de tomografia sísmica.

Embora a tomografia de refração sísmica não permitisse caracterizar a distribuição espacial da contaminação, seu emprego revelou-se útil a determinação do volume de sedimentos, calculado usando a regra de 3/8 de Simpson incorporada no *software* Surfer12, cujo valor foi estimado em $(228.5 \pm 26.8) \times 10^3 \text{ m}^3$.

O objetivo da tomografia de resistividade elétrica foi o de caracterizar a distribuição espacial da resistividade elétrica no sentido de relacionar com a distribuição da contaminação. Os valores de resistividade encontrados enquadram-se entre os valores típicos de aluviões e argilas. Isto sugere que a contaminação é pontual e dispersa, não tendo sido possível identificar zonas de maior ou menor concentração de metais pesados com dimensões que fossem sensíveis ao método. Isto evidencia uma das limitações do método elétrico.

O assoreamento rápido verificado no setor B, bem como os objetos observados à superfície, tais como, pedaços de papel e arames, podem ter influenciado as medições do oitavo perfil de resistividade elétrica originando elevados erros. Pode-se associar a estes fatores o facto de que a zona se encontrava muito seca a ponto de ser necessário molhar a volta dos eléctrodos. A origem do elevado erro do sexto perfil não foi devidamente identificada.

O primeiro, quinto e sexto perfis de tomografia sísmica são os menos profundos, o que revela a proximidade ao soco. Isto vai de encontro com a topografia, porque estes perfis foram feitos no bordo Sul do setor A, mais próximo de regiões onde é possível observar o afloramento do soco.

Apesar de ser difícil estabelecer relações óbvias com os resultados das análises químicas, os resultados da tomografia elétrica dos perfis 1, 2, 3 e 5, revelaram-se muito diferentes (resistividades mais baixas) dos resultados do perfil 4. Ao analisar as concentrações dos elementos químicos dos pontos que se encontram junto destes locais, notou-se que o ponto de amostragem próximo da região onde estão os perfis 1, 2, 3 e 5

(ponto de amostragem CA2-10A) apresentava concentrações mais elevadas do que as concentrações obtidas no ponto de amostragem junto ao perfil 4 (ponto de amostragem CA1-31, especialmente para os elementos As, Cd, Pb e Zn). No anexo 1.2 apresenta-se uma tabela das concentrações dos pontos de amostragem citados, bem como uma figura que mostra sua localização. Isto sugere apontar a elevada concentração de metais junto aos quatro primeiros perfis como sendo uma provável causa dos baixos valores de resistividade neles obtidos, comparativamente aos valores obtidos no quarto perfil. Isto não quer dizer necessariamente que a contaminação diminui em direção a foz do córrego, já que mais a Norte do quarto perfil foram encontradas, em certos pontos, concentrações elevadas.

6-REFERÊNCIAS

6. REFERÊNCIAS

- Alonso, M., Finn, J. E. (2012). *Física*. Escolar Editora. Lisboa.
- Araújo, A., Fonseca, R., Pinto, P., Fernandes, M. & Matos, J. (2013). Cartography of contaminants around a plant for the production of zinc (Três Marias, Minas Gerais, Brazil). In N. Moreira, R. Dias e A. Araújo (Eds.): *Geodinâmica e Tectónica global: a Importância da Cartografia geológica*, 9ª Conferência Anual do GGET-SGP, Livro de Atas, pp. 71-74.
- Barker, R. D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54(8), 1031-1037.
- Burger, H. R., Anne, F. S. & Graig, H. J. (2006). *Introduction to Applied Geophysics. Exploring the Shallow Subsurface*. W. W. Norton & Company.
- Burton, B., Sheehan, J. & Rohdewald, S. (2010). *Processing of Seismic Refraction Tomography Data. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Keystone, Colorado.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2011). *Métodos numéricos para engenharia*. McGraw Hill Brasil.
- Costa, F. P. (ed.), Pinto, J. T. (ed.), Buescu, J. (ed.). (2013) *Matemática do planeta Terra*. IST Press.
- deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magneto telluric data. *Geophysics*, 55(12), 1613-1624.
- Dey, A. (2011). Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. (Original publicado em 1979 com Morrison, H. F.).
- Edwards, L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42(5), 1020-1036.
- Ellis, R.G. & Oldenburg, D.W., (1994a), Applied geophysical inversion: *Geophysical Journal International*, **116**, 5-11.
- Elis, V. R., Mendonça, C. A., Porsani, J. L., & Strobino, E. D. F. (2008). O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(3), 317-325.

- Fontoura, M.J. Moura, R.M.M. & Dias, A.G. (2011). A Geologia e a Geofísica na avaliação da contaminação associada a Vazadouros Controlados – o caso do VC de Matosinhos no Norte de Portugal. *Comunicações Geológicas* 98, 83-92. Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP.
- Fonseca, R. M. F., (Dezembro 2014). 3º Relatório de Progresso sobre a estratégia de remediação dos Córrego Consciência e Barreiro Grande – 2ª Fase. Évora.
- Gaines, D. P., (2011). *Advances in Seismic First-arrival Tomography*. (Dissertação de Doutoramento, Universidade deTennessee).
- Hagedoorn, J. G., (1959). The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical prospecting*, 7(2), 158-182.
- Hayt, W. H., Buck, J. A., (2008). *Eletromagnetismo*. 8ª ed.. Tradução de Amilton Soares Júnior. McGraw-Hill Brasil. São Paulo.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M., (1989), *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561.
- Kearey, P., Brooks M. & Hill, I., (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* third edition. Blackwell science. Oxford.
- Lines L.R. & Treitel S., (1984). Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, **32**, 159-186.
- Loke, M.H., (1994). The inversion of two-dimensional resistivity data. Unpubl. PhD thesis, Un. Of Birmingham.
- Loke, M.H., (1999). Time-lapse resistivity imaging inversion. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Em1.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies*. Penang, Malaysia. 57 p.
- Loke, M.H., (2001). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Goelectrical*.
- Loke, M.H. & Barker, R.D., (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, **60**, 1682-1690.
- Loke M.H. & Barker R.D., (1996a). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**, 131-152
- Loke, M.H. & Barker R.D., (1996b). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, **44**, 499-523

- Loke, M.H. & Dahlin, T., (2002). A comparison of Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149-162. (IF 1.327).
- Loke, M.H. & Dahlin, T., (1997). A combined Gauss-Newton and Quasi-Newton inversion method for the interpretation of apparent resistivity pseudosections. *Procs. 3rd Meeting of the European Association for Environmental and Engineering Geophysics*, 8-11 Sept. 1997, Aarhus, Denmark, 139-142.
- McGillivray, P.R. & Oldenburg, D.W., (1990). Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study. *Geophysical Prospecting*, **38**, 499-524.
- Mendes, M. S. & Teixidó, T. (2008). Near Surface 2008 - 14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- Metwally, M., Ahmed, M., El-Said, K., & Abeer El-Kenawy, A., (2012). Tracing subsurface oil pollution leakage using 2D electrical resistivity tomography. *Arab J Geosci* DOI 10.1007/s12517-012-0600-z.
- Milson, John., (2003). *Field Geophysics* third edition. John Wiley and Sons Ltd. Chichester.
- Mussett, A. E., & Khan, M. A., (2000). *Looking Into the Earth. An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge University Press.
- Oldenburg, D. & Li, Y (1999). Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, VOL. 64, NO.2. P. 403-416, 11 Figs.
- Oliveira, J. P. L. (2009). Caracterização da pluma de contaminação numa antiga lixeira com o método de resistividade elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Palmer, D. (1981). An Introduction to the Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation: *Geophysics*, 46, 436-437.
- Palmer D. (2006). Integrating Amplitudes and Traveltimes with High Resolution Refraction Methods. *SAGEEP Proceedings*, pp. 1222-1240
- P.A.S.I. (2011). *Electrical Imaging System 16G-N. User's Manual*. Torino.
- Powers, M. H., & Burton, B. L. (2007). Questa base line and pre-mining ground-water quality investigation. 24. Seismic refraction tomography for volume analysis of saturated alluvium in the Straight Creek drainage and its confluence with Red River, Taos County, New Mexico: U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2006-5166, 19 p.

- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., & Vetterling, W.T. (1988), *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.
- Qin, F., Lou, Y., Olsen, K., Cai, W., & Schuster, G. (1992). Finite-difference solution of the eikonal equation. *Geophysics*, 57, 478-487.
- Redpath, Bruce B. (1973). Seismic Refraction Exploration For Engineering Site Investigations. Explosive Excavation Research Laboratory. Livermore, California.
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley and Sons Ltd. Chichester.
- Rohdewald, S. R., (October 12th 2004). Comparison of pseudo 2D Delta-t-V initial model with 1D gradient initial model, with synthetic data set “Broad Epikarst” as made available by Jacob Sheehan, Oak Ridge National Laboratory. Intelligent Resources Inc.. Vancouver,. Disponível em <http://rayfract.com/tutorials/broadepi.pdf>.
- Rohdewald, S. R (n.d.). The DeltatV 1D method for seismic refraction inversion: Theory Intelligent Resources Inc. Suite 142, 757 West Hastings Street, B.C.
- Roy, A., & Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36: 943–959.
- Schuster, G. T., & Quinuz-Bosz, A. (September 1993). Wavepath eikonal traveltime inversion: Theory. *Geophysics*, Vol. 58, Nº 9.P. 13144323, 5 Figs.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). Physics for Scientists and Engineers sixth edition. Thomson Brooks/Cole.
- Sharma, P. V. (1997). *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press.
- Sheehan J.R., Doll, W.E., & Mandell, W.A. (2005). An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, volume 10, pp. 21-34. ISSN 1083-1363, Environmental and Engineering Geophysical Society. JEEG issue.
- Sheriff, R.E., & Geldart, L. P. (1995). Exploration seismology: Cambridge; New York, Cambridge University Press.
- Silvester P.P. & Ferrari R.L., (1990). Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.). Cambridge University Press.
- Soares, A. C. P. (coordenação geral). (2011). Mapa geológico à escala 1/100.000, Folha Três Marias – SE.23-Y-B-III. Governo do Estado de Minas Gerais, Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, Ministério de Minas e Energia,

- Secretaria de Geologia Mineração e Transformação Mineral, CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Souplos, P. Papadopoulos, I. Kouli, M. Georgaki, I. Vallianatos, F. & Kokkinou, E. (2006). Investigation of waste disposal areas using electrical methods: a case study from Chania, Crete, Greece. *Environ Geol.*
- Stummer, Peter (2003). New Developments in Electrical Resistivity Imaging. PhD on Natural Sciences. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* Second Edition. Cambridge University Press.
- Wolke, R. & Schwetlick, H., (1988). Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons: *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, **9**, 907-921.
- <http://rayfract.com/tutorials/broadepi.pdf>
- <http://rayfract.com/tutorials/depress.pdf>
- <http://rayfract.com/tutorials/palmfig3.pdf>
- <http://rayfract.com/tutorials/fig9inv.pdf>
- <http://rayfract.com/tutorials/epikinv.pdf>
- <http://rayfract.com/tutorials/thrust.pdf>
- <http://www.geotomosoft.com/downloads.php>
- <http://www.pasisrl.it>

7-ANEXOS

7. ANEXOS

Anexo 1 Resultados das análises químicas

1.1 Mapas de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para diferentes profundidades.

Todas as figuras deste anexo foram extraídas Relatório de Progresso Sobre a estratégia de Remediação dos Córrego Consciência e Barreiro Grande – 2ª Fase. Évora. Dezembro, 2014.

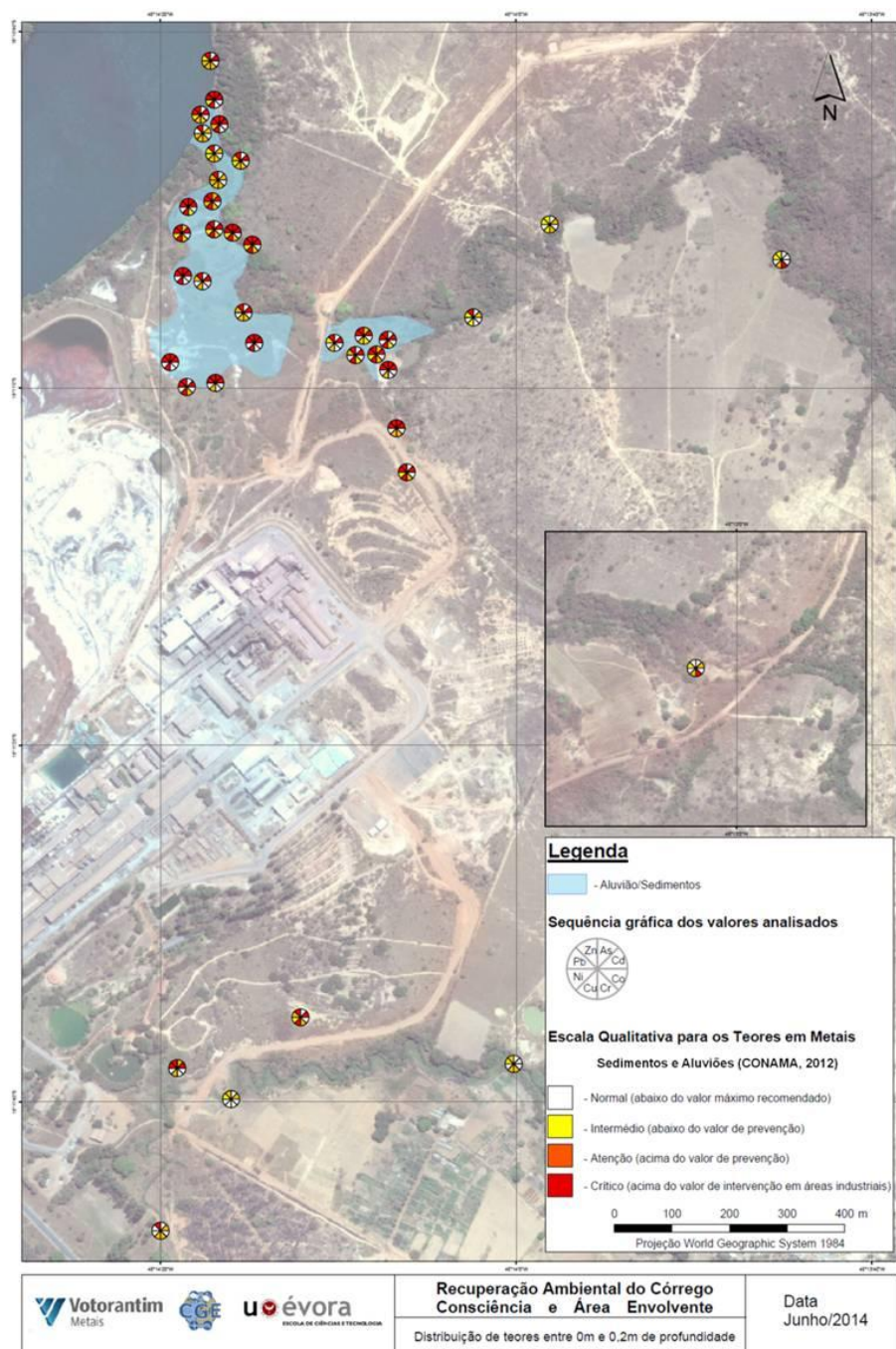


Figura 7.1. Mapa de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para profundidades entre 0-0.2 metros.

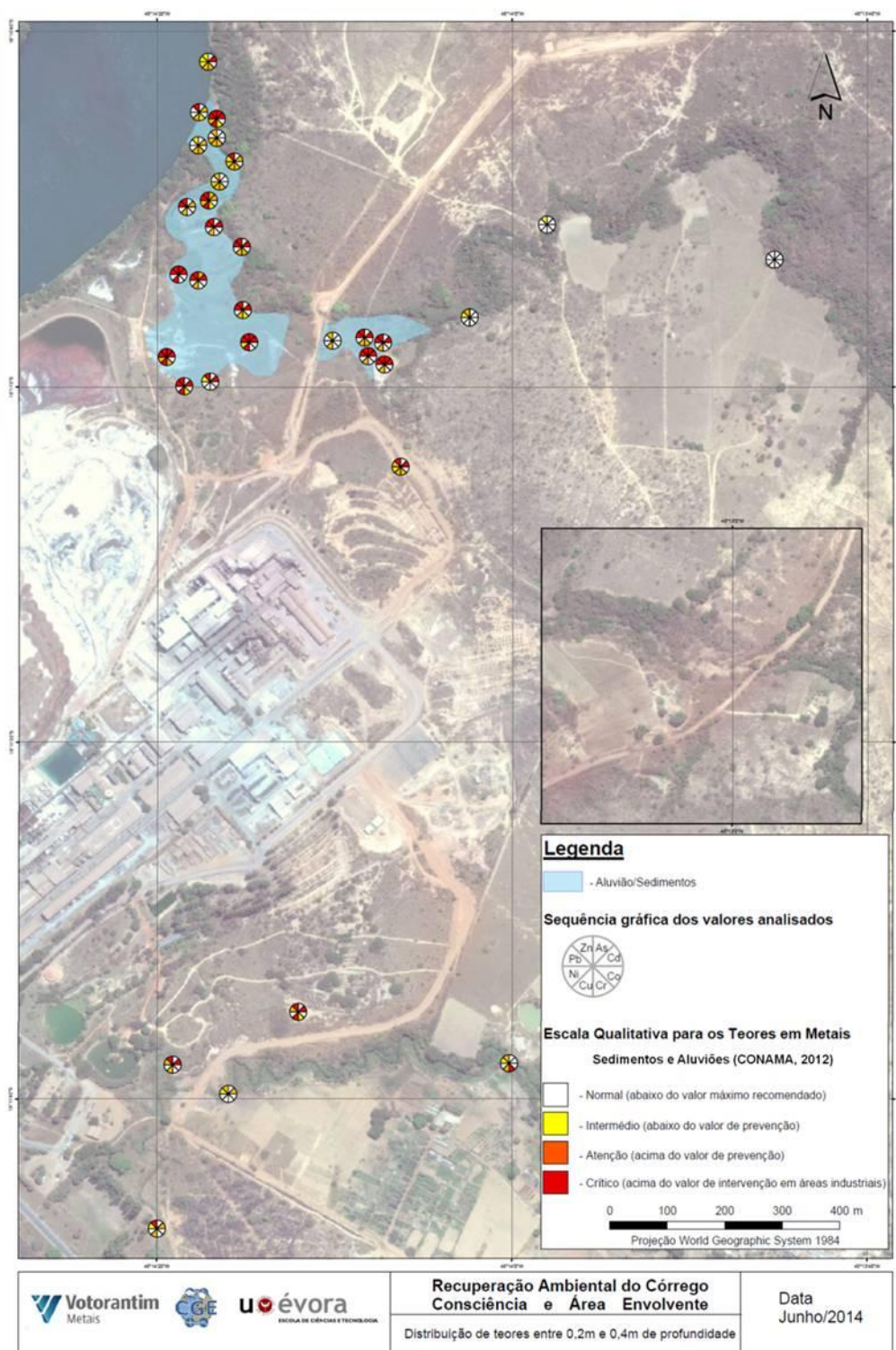


Figura 7.2. Mapa de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para profundidades entre 0,2-0,4 metros.

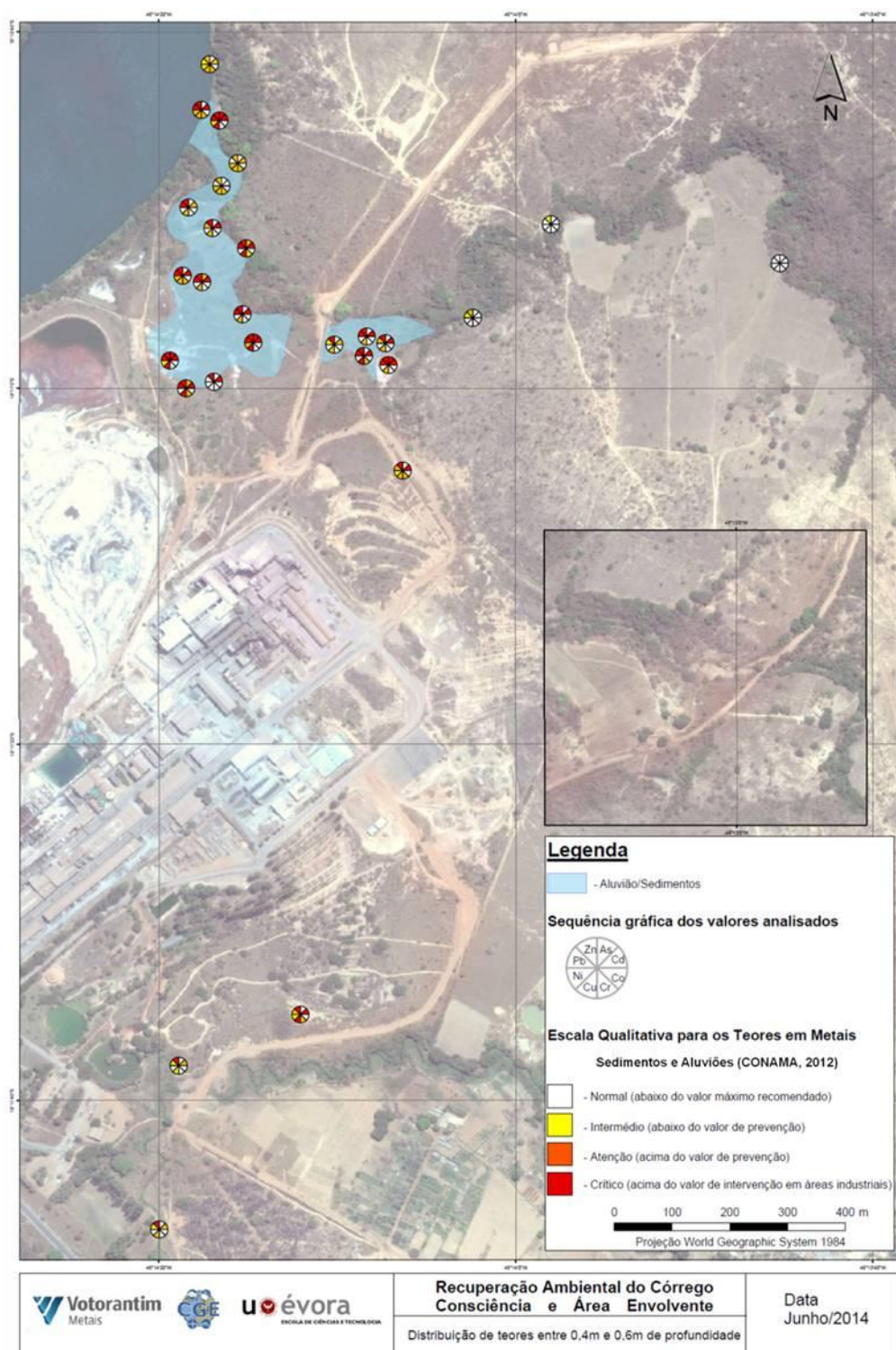


Figura 7.3. Mapa de distribuição qualitativa dos resultados das análises químicas para profundidades entre 0.4-0.6 metros.

Anexo 1.2. Pontos de amostragem e tabela das concentrações



Figura 7.4. Pontos de amostragem geoquímica

Foram considerados apenas os pontos CA2-10A, CA1-48 e CA1-31. Os dois primeiros não estão junto a perfis considerados, mas permitem ter uma ideia da concentração de metais nesta região da bacia, em comparação com o ponto junto ao quarto perfil.

Amostras	Profundidade (cm)	Valores Totais (Extração com <i>Aqua Regia</i>)										
		As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe		Mn	Ni	Pb	Zn
		(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)		(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)
CA1-31	0-20	< 0,25	1.2540	4.7225	56.381	79.1715	48998.42		238.629	19.007	38.8996	661.3658
	20-40	< 0,25	< 0,025	3.4935	70.435	69.4358	52065.9298		115.600	21.618	2.6304	188.5701
	40-60	< 0,25	< 0,025	4.2091	59.430	59.5555	73544.2761		140.901	18.91	2.7966	159.0622
CA1-35	0-10	< 0,25	3.6396	3.5141	24.402	49.5041	27746.3803		139.858	6.6956	23.3365	684.2854
	10-20	< 0,25	2.5388	3.1750	22.462	39.2468	21478.8121		88.5218	6.4533	14.6647	404.2737
	20-30	< 0,25	0.4017	2.9996	19.378	35.5212	13621.0394		83.0837	5.9411	3.2911	124.9345
	30-40	< 0,25	0.3714	3.2531	23.762	41.9216	15757.4798		99.1612	7.0297	4.3389	137.4154
	40-50	< 0,25	0.8478	3.2392	21.467	35.4401	21336.6338		84.2367	6.5492	7.6001	215.1522
	50-60	< 0,25	0.5554	2.7196	20.162	32.2630	21297.3632		61.5299	6.3634	3.8120	127.5155
	60-80	< 0,25	0.6793	2.1711	20.368	32.7744	18649.2558		56.4562	5.8991	7.8688	198.1147
	80-100	< 0,25	0.3233	2.6209	23.028	37.1908	22497.7502		66.5690	7.1118	5.6278	172.7080
CA2-10	0-20	11.393	59.050	3.9809	26.142	132.908	52408.4395		138.030	14.959	427.3163	28960.987
	20-40	61.453	3.1152	5.6920	17.762	105.746	153085.680		94.4708	12.476	1664.535	58458.158
	40-60	72.683	3.6566	7.1457	20.599	103.062	162602.438		141.164	16.948	1785.941	65720.567
	60-80	24.724	11.645	6.6824	38.550	418.269	211564.469		263.816	17.192	1502.541	46804.905
	80-100	34.005	14.465	8.7351	28.477	348.053	207635.921		215.008	18.091	1803.571	51325.496
	2,40 m	24.192	39.114	2.9683	22.624	257.730	124755.697		113.454	12.753	845.7650	36257.510

Tabela 7.1. Concentrações dos metais poluentes.

São apenas apresentadas as concentrações de alguns pontos de amostragem que estão localizados próximo a alguns perfis. A figura acima da tabela localiza os pontos e os perfis.

Nota: o ponto CA2-10A localiza-se junto ao perfil 6, que não foi tido em conta nas análises, mas sua localização não é muito distante do perfil 5. Justifica-se a utilização deste ponto pelo facto de fornecer informações da presença dos poluentes na vizinhança dos perfis que apresentam valores de resistividade muito próximos (pelo menos até aos 60 cm), para uma comparação com o ponto que está mesmo junto ao quarto perfil que apresenta valores de resistividade bastante diferentes dos outros perfis feitos no setor A.

Anexo 2 Construção do modelo sintético e consequente processamento

I. Criação do perfil no Rayfract 3.31

1. Correr o Rayfract 3.31.
2. Selecionar File|Create New Profile. Atribuir um nome. No presente caso criou-se uma pasta com o nome “sints6_3” dentro da qual criou-se o perfil/projeto com nome “exp”. Nota: o nome do perfil não deve ser extenso.
3. Guardar o projeto com a seguinte diretoria C:\RAY32\sints6_3\exp.
4. Selecionar Header|Profile. Editar os parâmetros na caixa de diálogo (figura 7.5). Os parâmetros essenciais são: Line ID, Line type, Job ID, instrument, Client e Station spacing. Os outros podem não ser preenchidos. Preencher o campo station spacing com 0.5, que é o espaçamento entre as estações e em Line type selecionar “Refraction spread/line”.

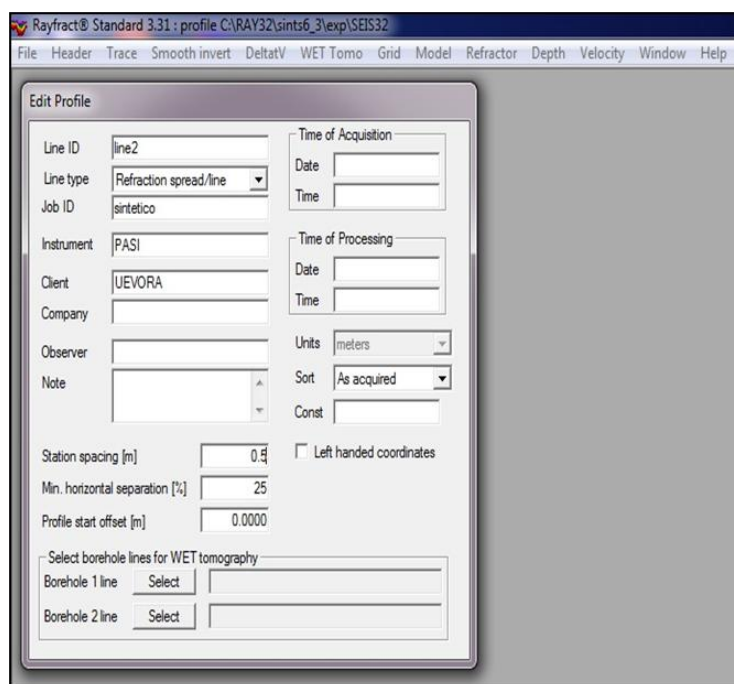


Figura 7.5. Caixa de diálogo de um novo perfil no Rayfract

5. Criar um ficheiro com o nome “oneshot” num editor de texto contendo informações iniciais, tais como, o nº de ordem do tiro, a posição do tiro e dos geofones e o tempo de primeiras chegadas para cada geofone (figura 7.6). Num perfil real esta informação é obtida mediante a importação dos tiros.

A posição dos tiros será atualizada no momento da importação do ficheiro “oneshot”. Os tempos de primeiras chegadas serão atualizados na inversão.

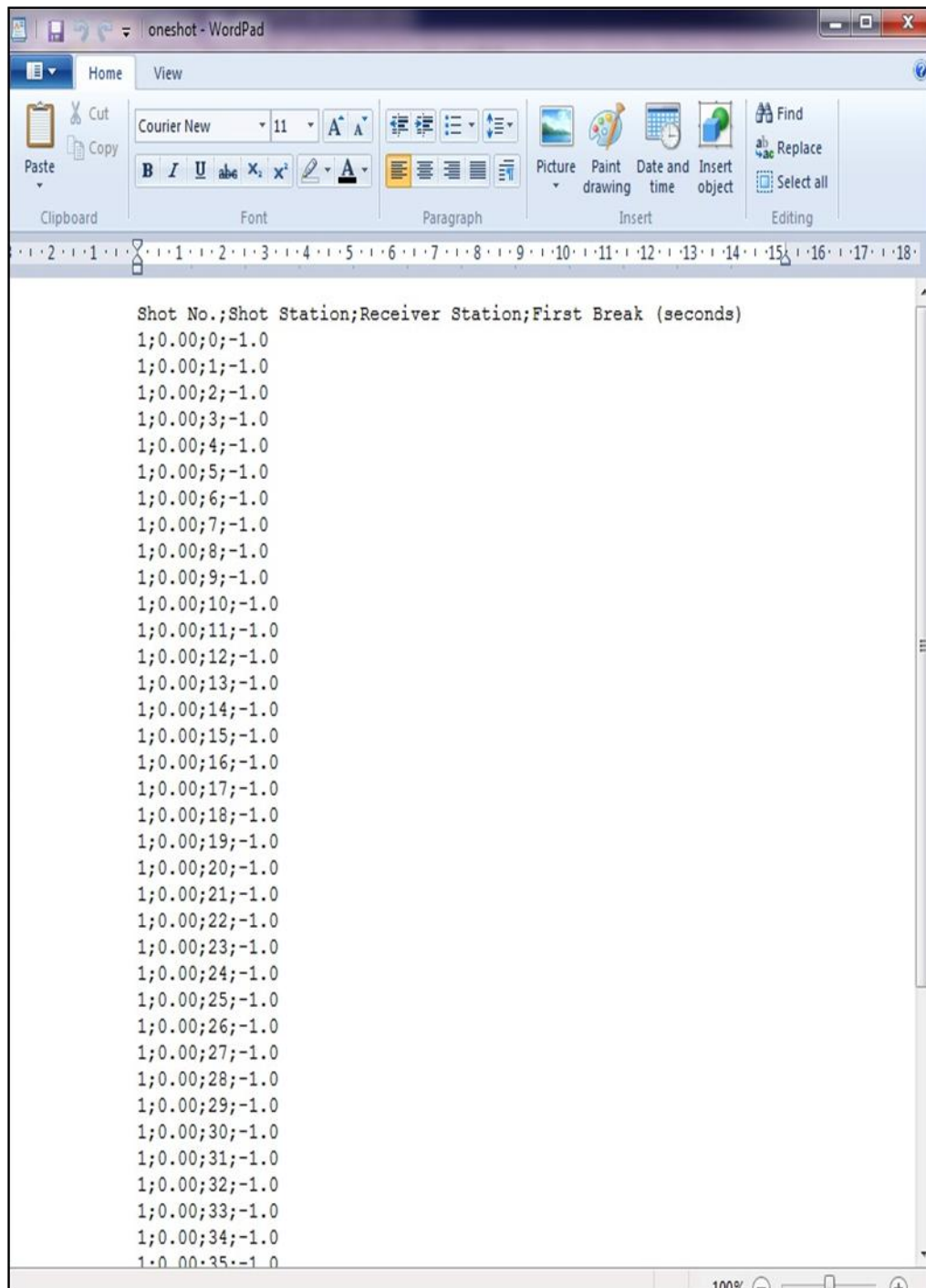


Figura 7. 6. Informação inicial dos tiros para um modelo sintético
Estes dados serão atualizados ao serem importados.

6. Guardar o ficheiro “oneshot” na diretoriaC:\RAY32\sints6_3\exp\INPUT\oneshot
7. Importar o ficheiro oneshot em File|Import shots. No campo Input directory seleccionar a diretoria do passo 6. No campo Import data type seleccionar ASCII column format. Deixar os outros campos com os valores por defeito e clicar em import shot (figura 7.7).

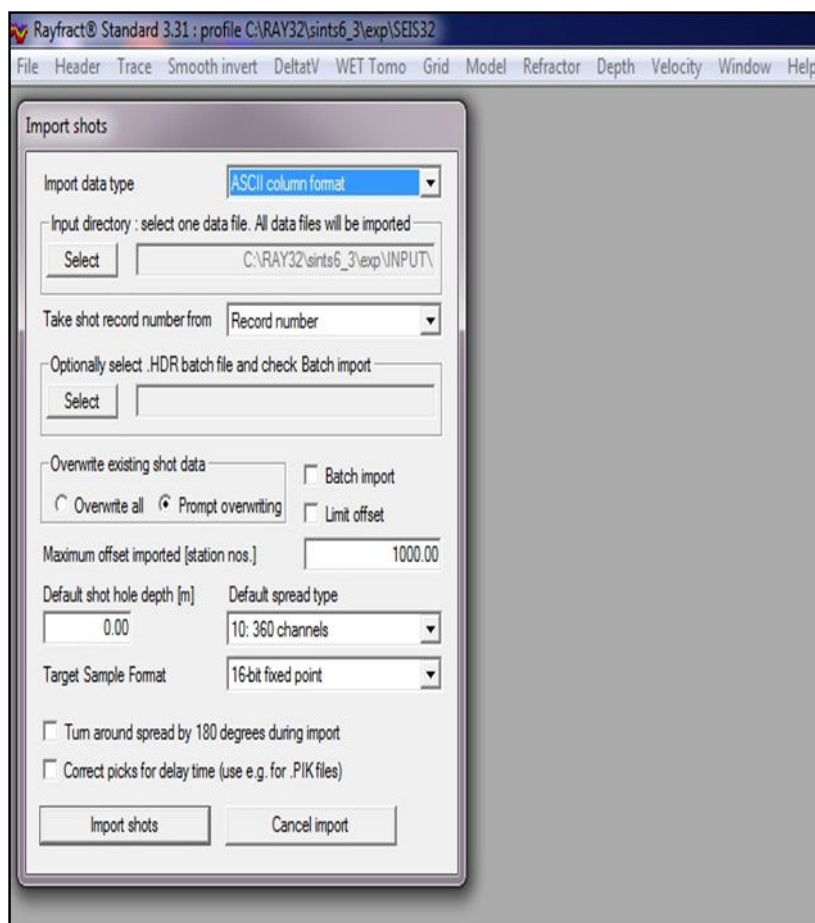


Figura 7.7. Informação no Rayfract do ficheiro com a informação inicial do perfil do modelo sintético

8. Ao clicar “import shots” no passo anterior abrir-se-á uma nova janela onde irão ser digitadas as informações sobre a geometria do perfil sísmico. No campo “Shot Number” digitar 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, que representam o número de tiros. No campo “Shotpos. [station no.]” digitar os seguintes valores: -0.5, 2.5, 5.5, 8.5, 11.5, 14.5, 17.5, 20.5, 23.5, 26.5, 29.5, 32.5, 35.5, 38.5, 41.5, 44.5, 47.5. Estes valores são obtidos da seguinte forma: 1- Criar um vetor com a posição dos tiros (17 tiros espaçados 1.5 metros, com o primeiro em 0 metros e o último em 24 metros). 2- Em cada valor do vetor subtrair a distância do primeiro tiro ao primeiro geofone (0.25 metros para o presente caso). O resultado dividir pelo espaçamento entre os geofones (0.5 metros para o presente caso). Para mais detalhes, consultar o manual do Rayfract disponível em <http://rayfract.com/>. Atenção: o Shot Number e o Shot pos devem ser digitados de forma intercalada. Por exemplo, digitar Shot Number 1 e Shot pos -0.5 e clicar “Read”. Em seguida repetir o procedimento a partir do passo 7 e digitar Shot Number 2, Shot pos 2.5 e clicar Read, e assim sucessivamente até terminarem todos os valores. Num perfil real apenas altera-se o Shot pos uma vez que o Shot

Number atualiza-se automaticamente ao importar os tiros conforme descrito no passo 7.

Feito isto, o perfil está criado.

I. Construção da malha no Suerfer11

1. Correr o Surfer11 e abrir um novo plot.
2. Selecionar Grid|Function. Na janela que se abre introduzir os valores conforme a figura 7.8.

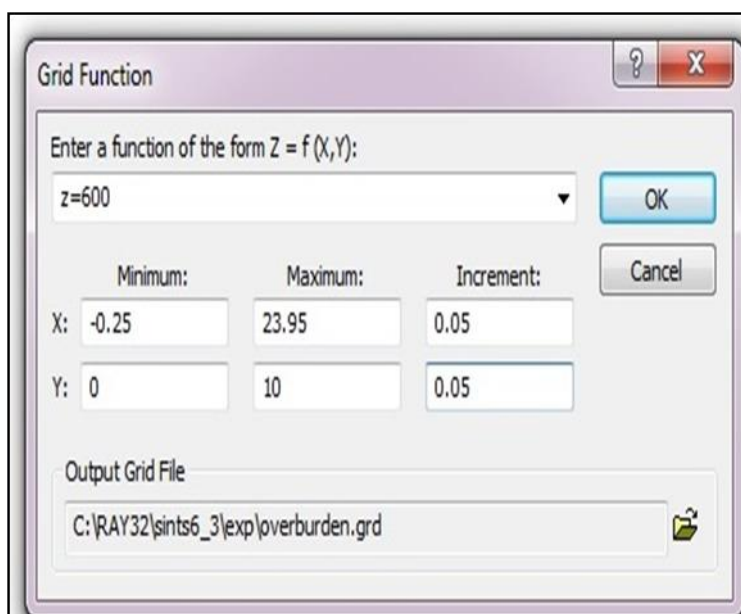


Figura 7.8. Criação de uma malha regular no Surfer12
Malha regular overburden, camada superior de baixa velocidade no modelo sintético.

3. Escolher a diretoria C:\RAY32\sints6_3\exp feita na criação do projeto no Rayfract3.31 para guardar com o nome “overburden” (sem as aspas) no formato grd e clicar ok.
4. Selecionar Grid|Funciton. Na janela que se abre introduzir valores conforme figura 7.8, alterando apenas z=600 para z=1800.
5. Escolher a mesma diretoria do passo anterior para guardar com o nome “basement” (sem as aspas) no formato grd e clicar ok. Notar que a diferença com o primeiro ficheiro consiste no valor de z e no nome.
6. Abrir uma New worksheet e editar o ficheiro bln com os limites do modelo pretendido. Digita-se os valores dos vértices dos limites, como mostra a figura 7.9.

A1		7	
	A	B	C
1	7	1	
2	-0,3	0,2	
3	-0,3	-2	
4	8	-2	
5	12	-4	
6	24	-4	
7	24	0,2	
8	-0,3	0,2	
9			
10			

Figura 7.9. Criação do ficheiro bln para os contornos do modelo sintético

7. Atribuir o nome “base” e guarda-lo no formato bln.
8. Selecionar Grid|Blank. Na caixa de diálogo que se abre seleccionar o ficheiro “basement” em seguida o ficheiro “base”.
9. Guardar o ficheiro com o nome “blankbasement” (sem as aspas) no formato grd.
10. Selecionar Grid|Mosaic. Na caixa de diálogo que se abre seleccionar o ficheiro overbuburden e em seguida clicar em “add” para adicionar o ficheiro “blankbasement”. Selecionar “Maximum” como método de sobreposição, tal como mostra a figura 7.10.

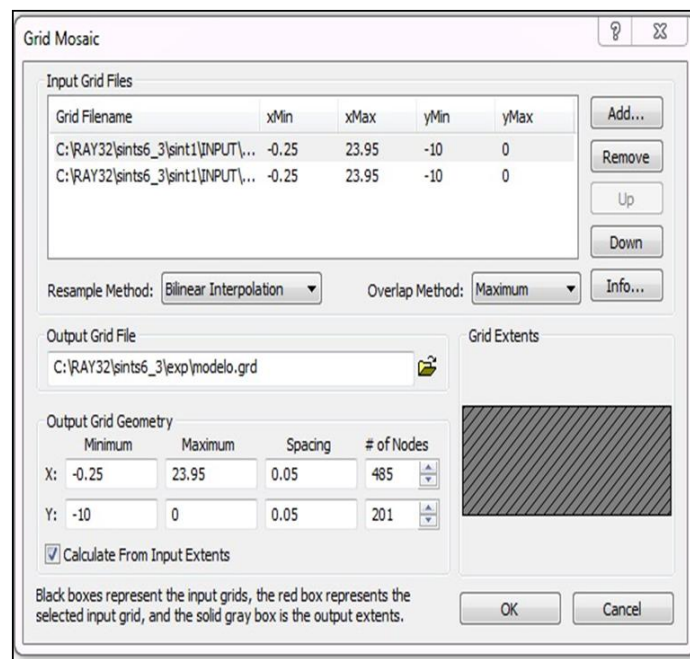


Figura 7.10. Criação do modelo sintético

Repare na ordem dos ficheiros; primeiro o overburden e depois o ficheiro blankbasemet criados nos passos 7 e 8.

11. Clicar em guardar com o nome “modelo” no formato grd.
12. Para visualizar o modelo criado selecionar Map|Imagemap e ir até a diretoria e escolher o ficheiro “modelo”.
13. Selecionar à esquerda image-modelo.grd e a baixo escolher a escala de cores BlueRed1. O resultado é o que se mostra na figura 7.11. Este é o modelo 2 (em escada com descida suave) representado na figura 2.3b.

Todos outros modelos foram criados da mesma forma, variando apenas o ficheiro base.blm que dá os contornos do modelo (alterações a partir do passo 6).

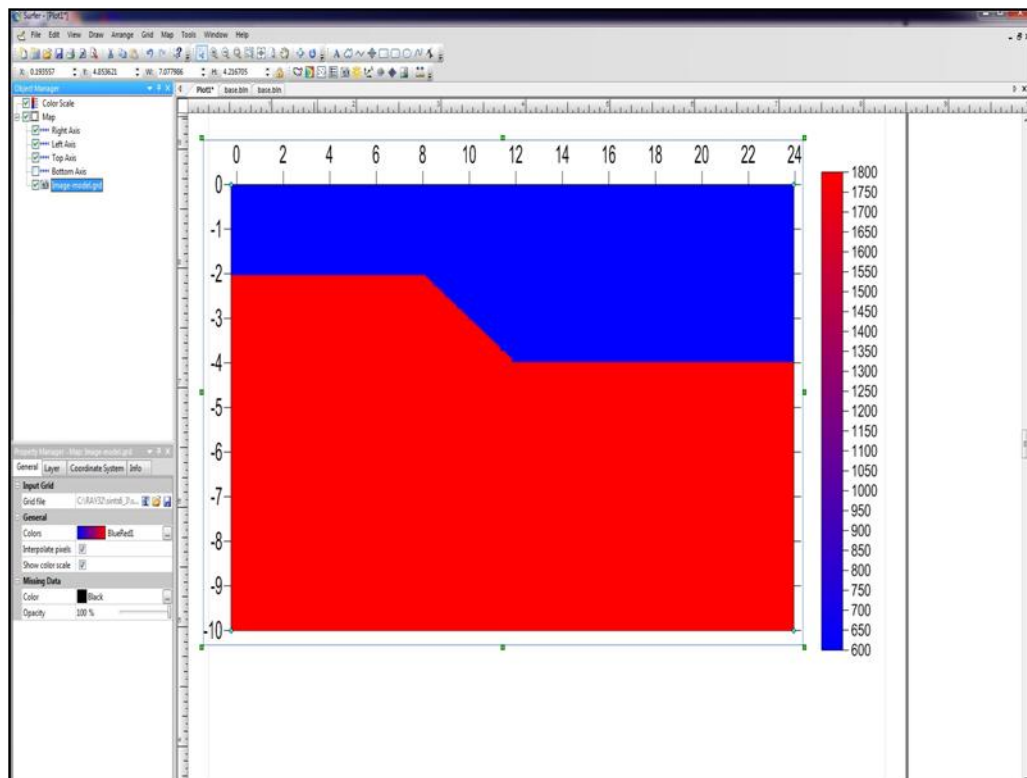


Figura 7.11. Modelo sintético em degrau com descida suave no Surfer12

II. Inversão do modelo criado em I e II.

1. No Rayfract selecionar File|OpenProfile. Ir até a diretoria C:\RAY32\sints6_3\exp e selecionar o ficheiro SEIS32 e clicar Open.
2. Selecionar Model|Model Synthetic Shots. Ir a diretoria anterior e selecionar “modelo” gerado pelo Surfer11 tal como mostrado em II.
3. Selecionar Smooth inversion|WET with 1D-gradient initial model. Como resultado desta operação será gerado o modelo inicial, conforme mostra a figura 7.12.

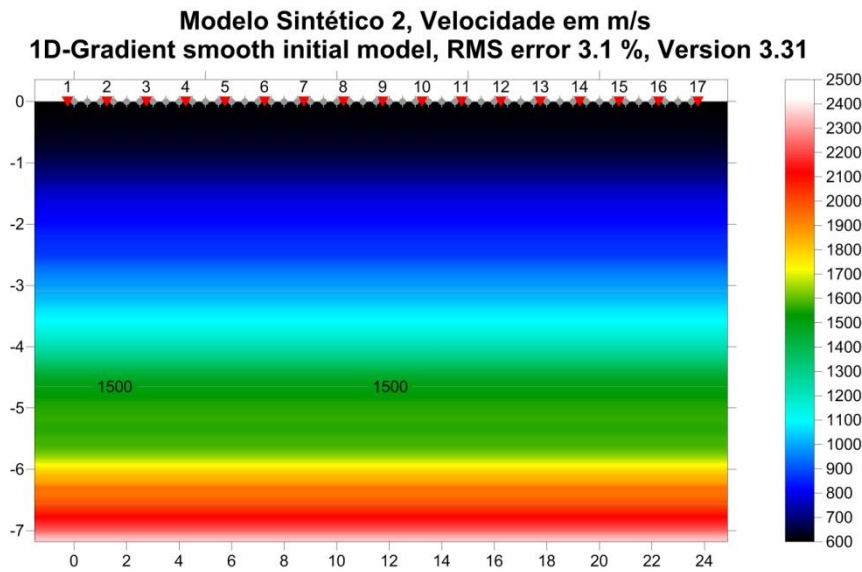


Figura 7.12. Modelo inicial 1D-Gradient Smooth para o modelo sintético 2
 Obtido a partir da horizontalização das velocidades do Pseudo-2D DeltaV.

4. Depois de correr, abrir-se-á uma janela de diálogo perguntando se pretende continuar com o processamento. Clicar em sim para gerar o modelo de velocidades com apenas 20 interações WET e com os parâmetros definidos por defeito. Se não quiser pode clicar em “Não” para interromper e depois controlar os parâmetros na inversão WET.
5. Selecionar WET Tomo|Interactive WET Tomography. Alterar para 100 o número de interações (7.13). O resultado será o tomograma representado na figura 2.3b p. 29.

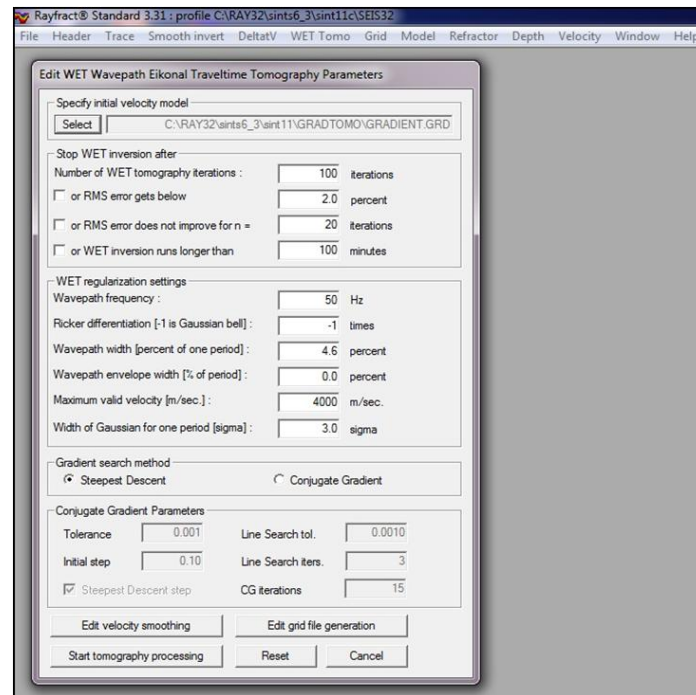


Figura 7.131. Parâmetros da interação na inversão WET

III. Representação da linha que marca a interface entre camadas (linha branca no tomograma da figura 2.3b).

1. Selecionar Refractor|Shotbreaks
2. No gráfico Tempo-Distância picar as primeiras chegadas na camada refratora (figura 7.14 esquerda).
3. Uma vez picadas as primeiras chegadas clicar Alt+L para mapear as picagens.
4. Selecionar Depth|Wevefront. Abrir-se-á um gráfico da elevação em função da distância.
5. Selecionar Window|Tile para colocar as figuras paralelamente uma da outra, tal como mostra a figura 7.14.

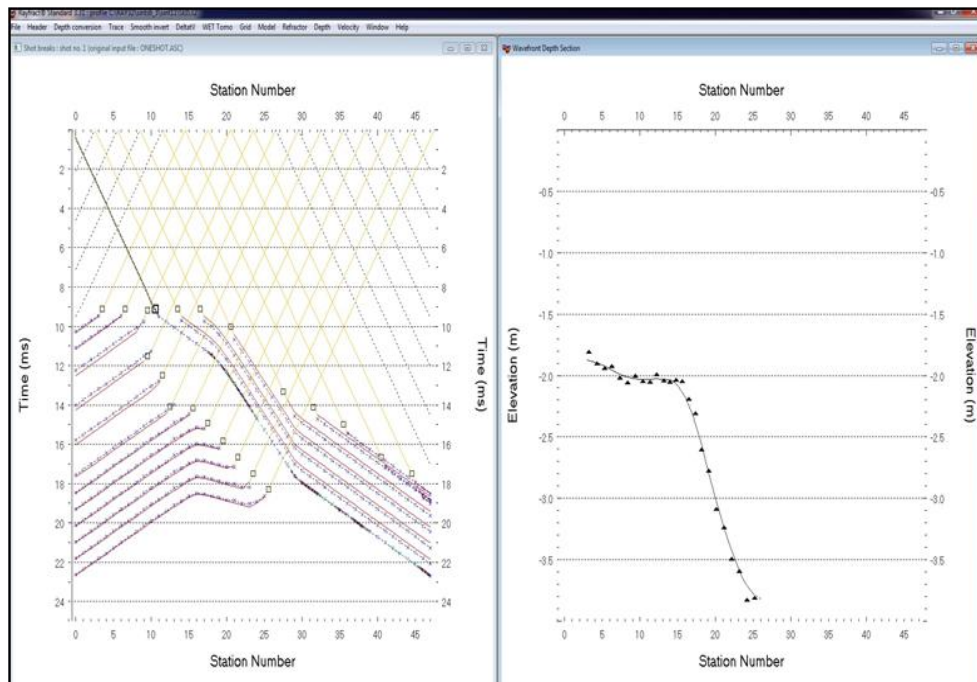


Figura 7.14. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 1
 Esquerda: Mapeamento da camada refratora (picagem das primeiras chegadas).
 Direita: Linha que acompanha a interface entre camadas. Estas figuras referem-se
 ao modelo representado na figura 2.3b (modelo em escada com descida suave).

1. Clicar sobre a janela Wavefront Depth Section e seleccionar File|Export header data|Export ASCII Model of Depth Section
2. Guardar com o nome na diretoria de trabalho “WAVEMODL”.
3. Seleccionar Grid|Plot refractors on tomogram
4. Seleccionar Grid|Select ASCII.CSV layer model for refractor plotting. Seleccionar o ficheiro “WAVEMODL” criado em 2.
5. Seleccionar Grid|image and contour velocity and coverage grids.

Foi desta forma que se gerou as linhas que marcam as interfaces entre camadas em todos os modelos sintéticos (figuras de 7.11-7.13).

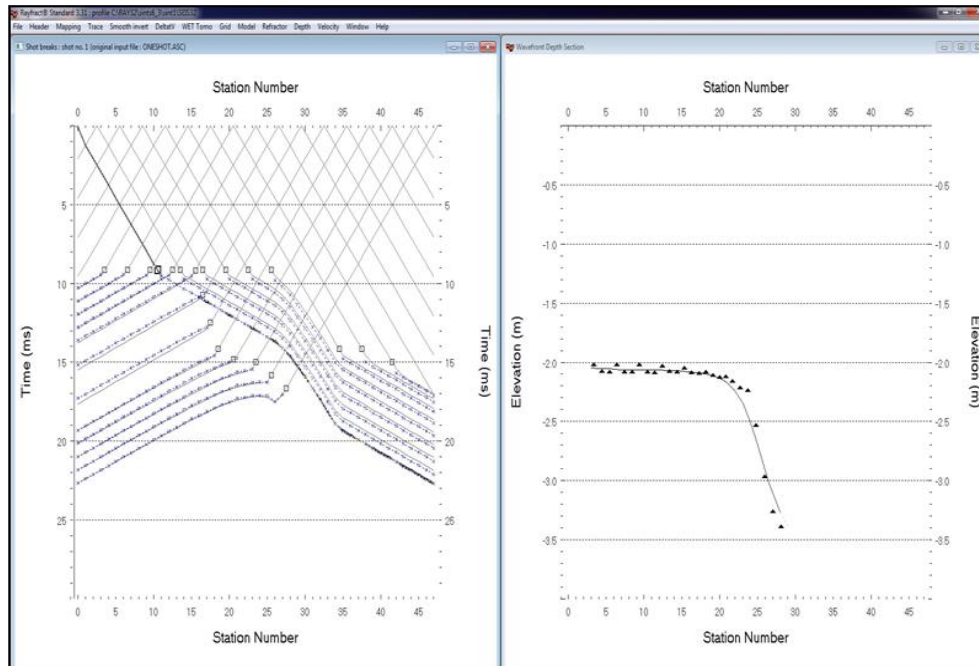


Figura 7.2. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 2. Esquerda: Mapeamento da camada refratora (picagem das primeiras chegadas). Direita: interface entre camadas. Estas figuras referem-se ao modelo sintético representado na figura 2.3a (modelo em escada com descida brusca).

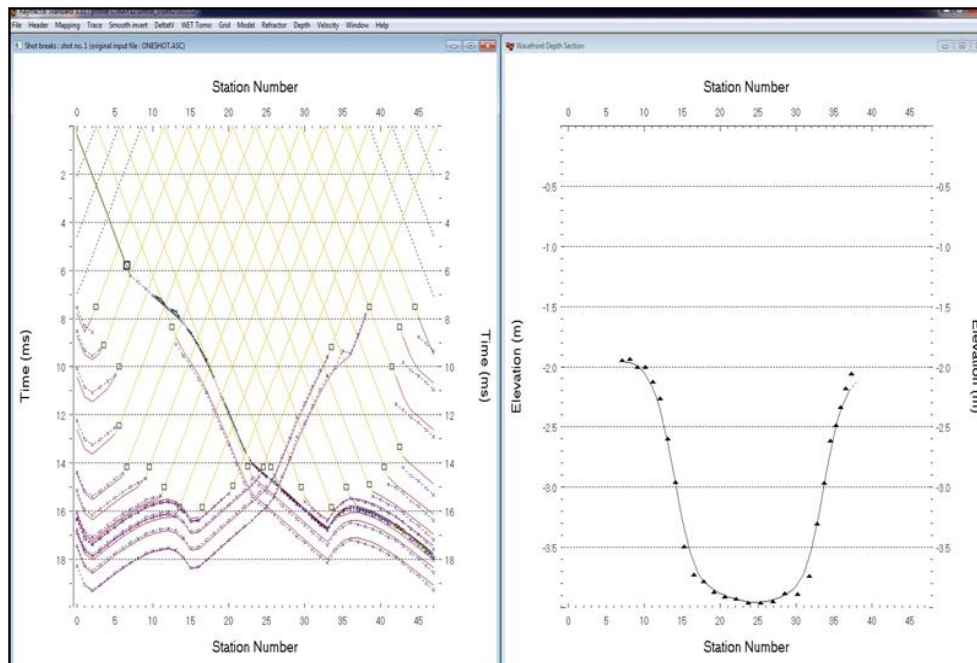


Figura 7.16. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético 3. Esquerda: Mapeamento da camada refratora (picagem das primeiras chegadas). Direita: interface entre camadas. Estas figuras referem-se ao modelo sintético representado na figura 2.4a (modelo dois degraus com descida brusca).

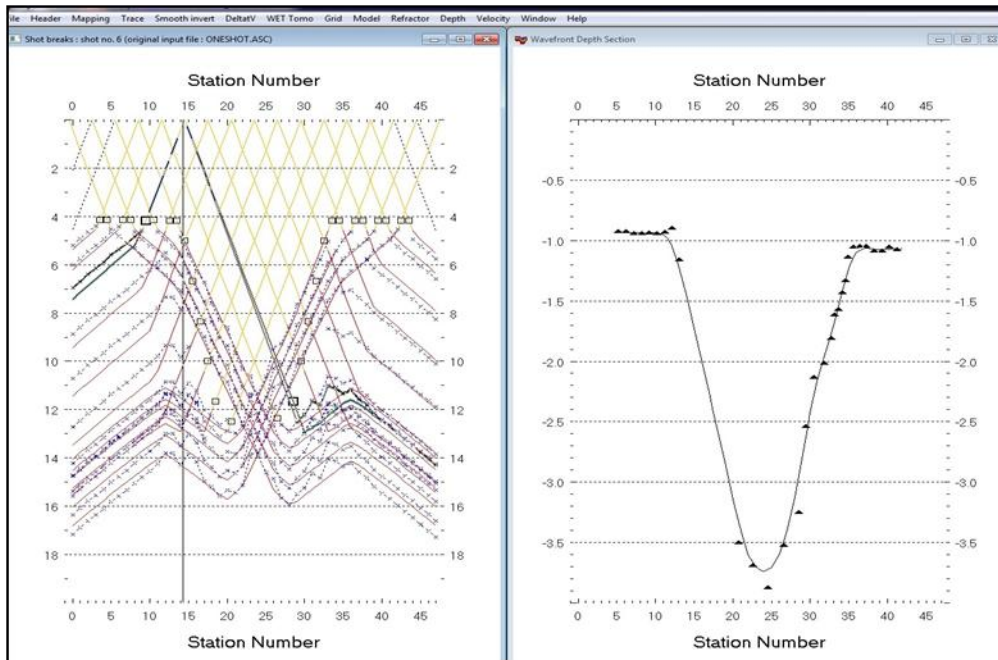


Figura 7.173. Primeiras chegadas e interface entre camadas do modelo sintético

4.

*Esquerda: Mapeamento da camada refratora (picagem das primeiras chegadas).
Direita: interface entre camadas. Estas figuras referem-se ao modelo representado
na figura 2.4b (modelo em degrau com descida suave).*

Anexo 3 - Modelos iniciais, tomogramas e cobertura de raios dos perfis sísmicos

Em todos os modelos temos em cima: Modelo inicial de velocidade, obtido a partir do Pseudo-2D DeltaV; No meio: Modelo de velocidades em baixo: Cobertura dos raios.

Perfil 1

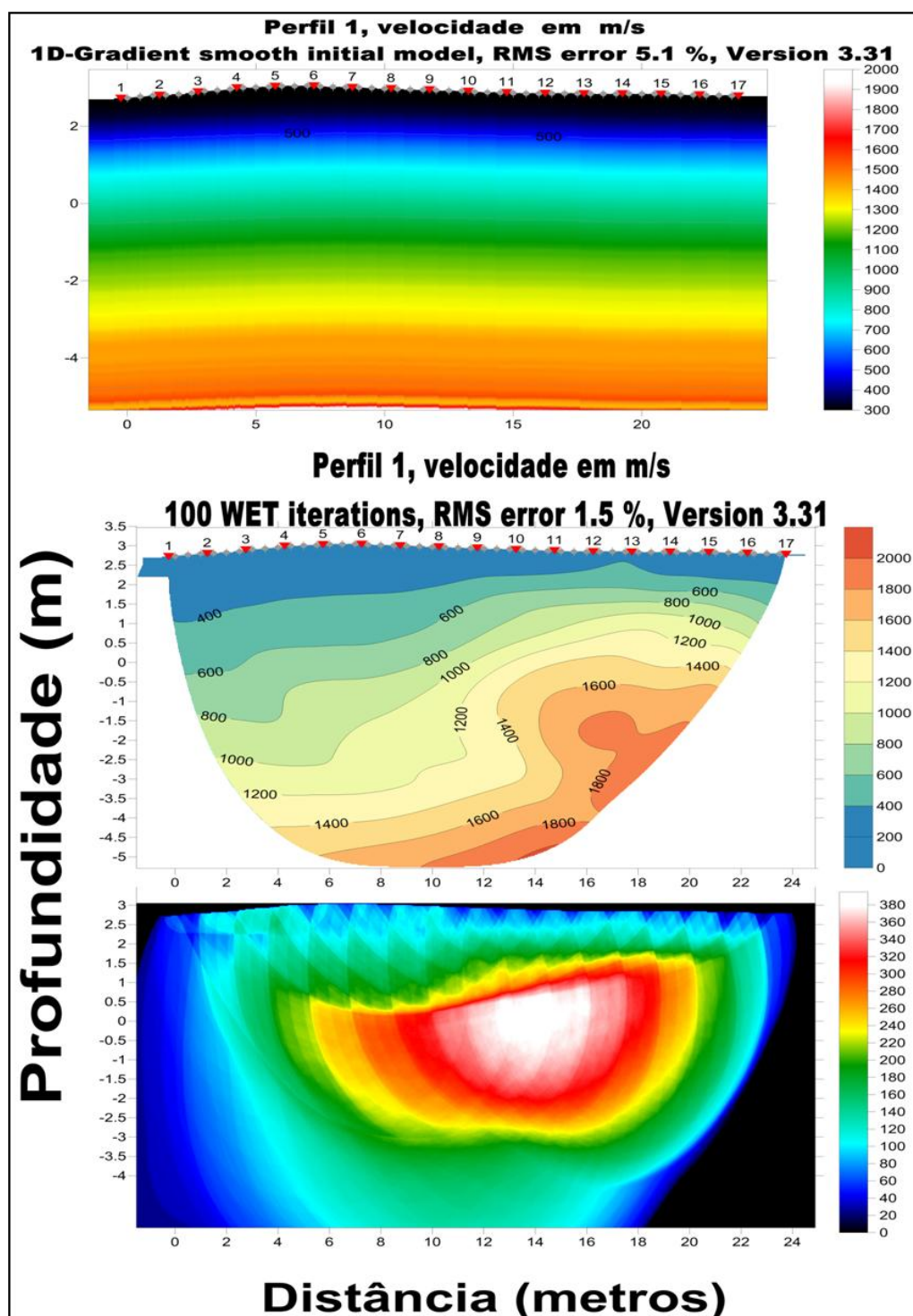


Figura 7.18. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do Perfil 1

Perfil 2

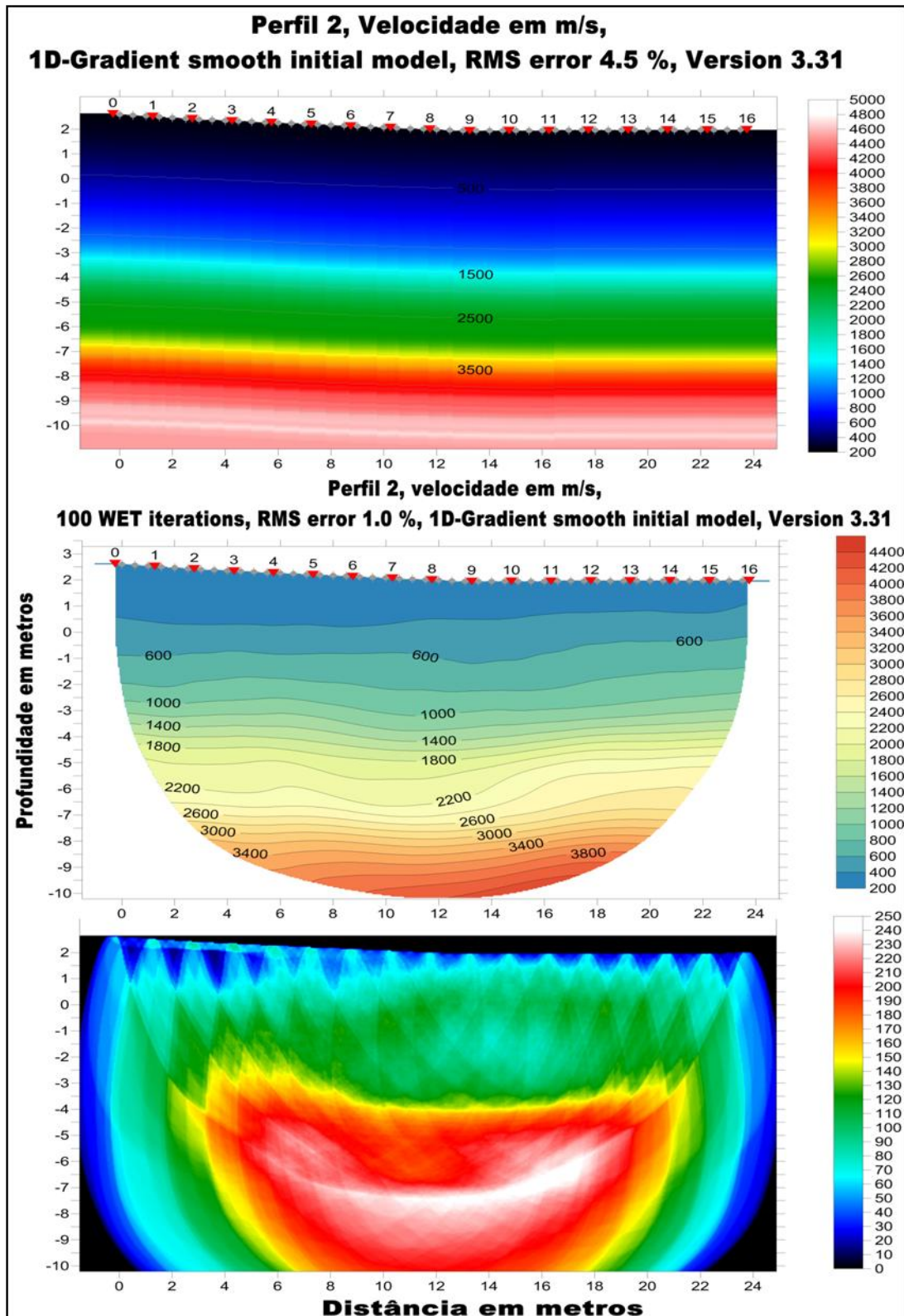


Figura 7.19. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 1 de sísmica

Perfil 3

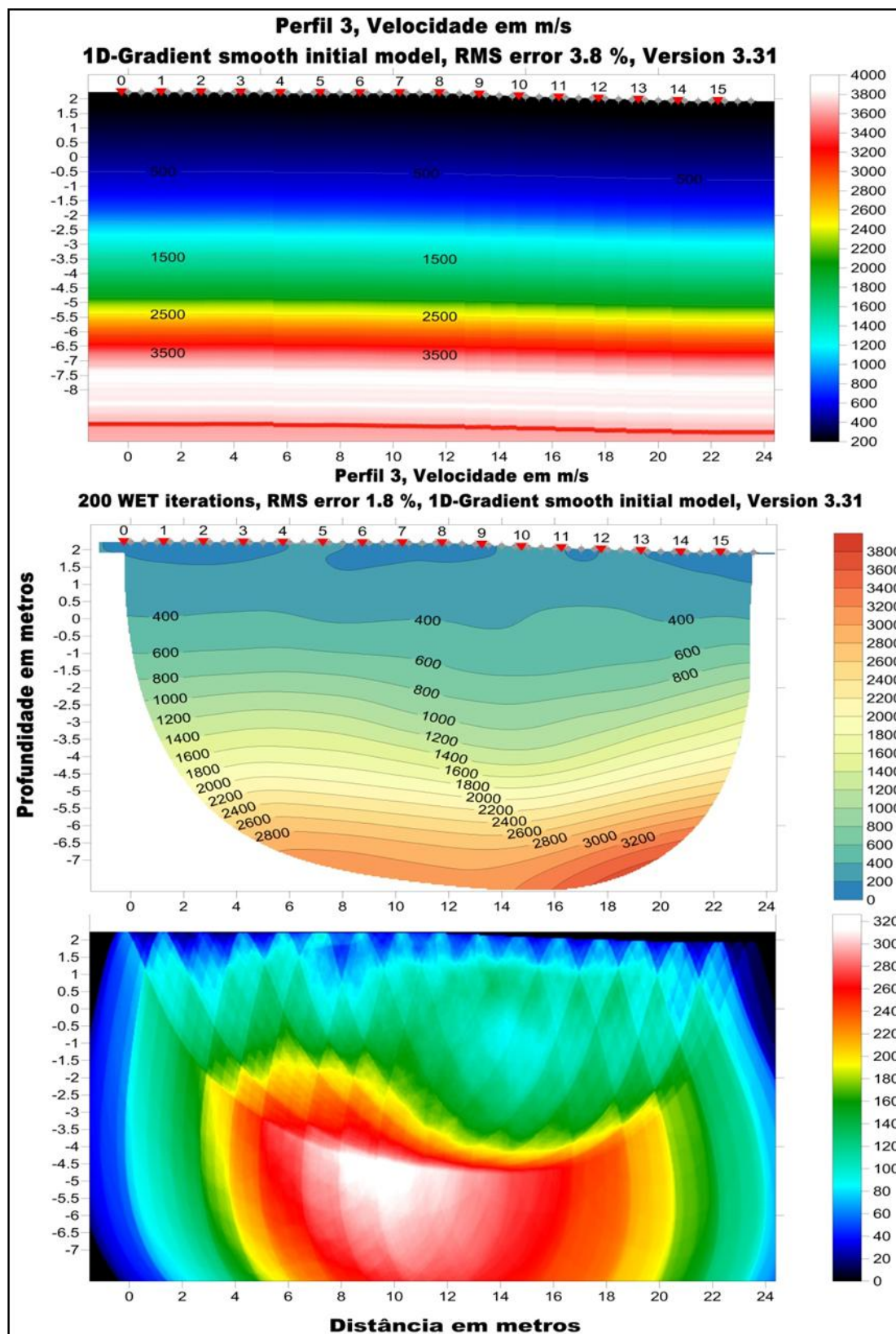


Figura 7.20. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 3 de s mica

Perfil 4

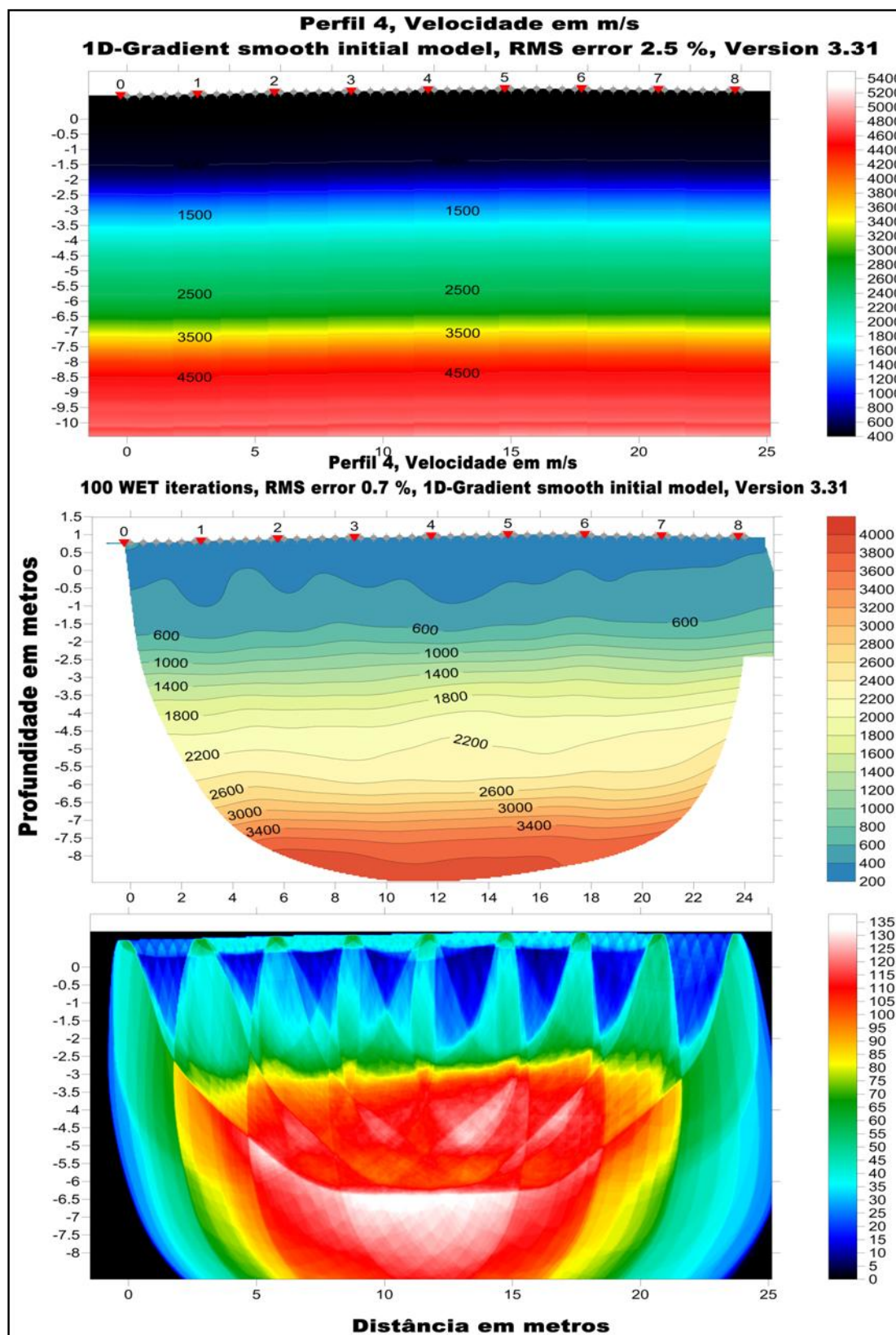


Figura 7.21. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 4 de sísmica

Perfil 5

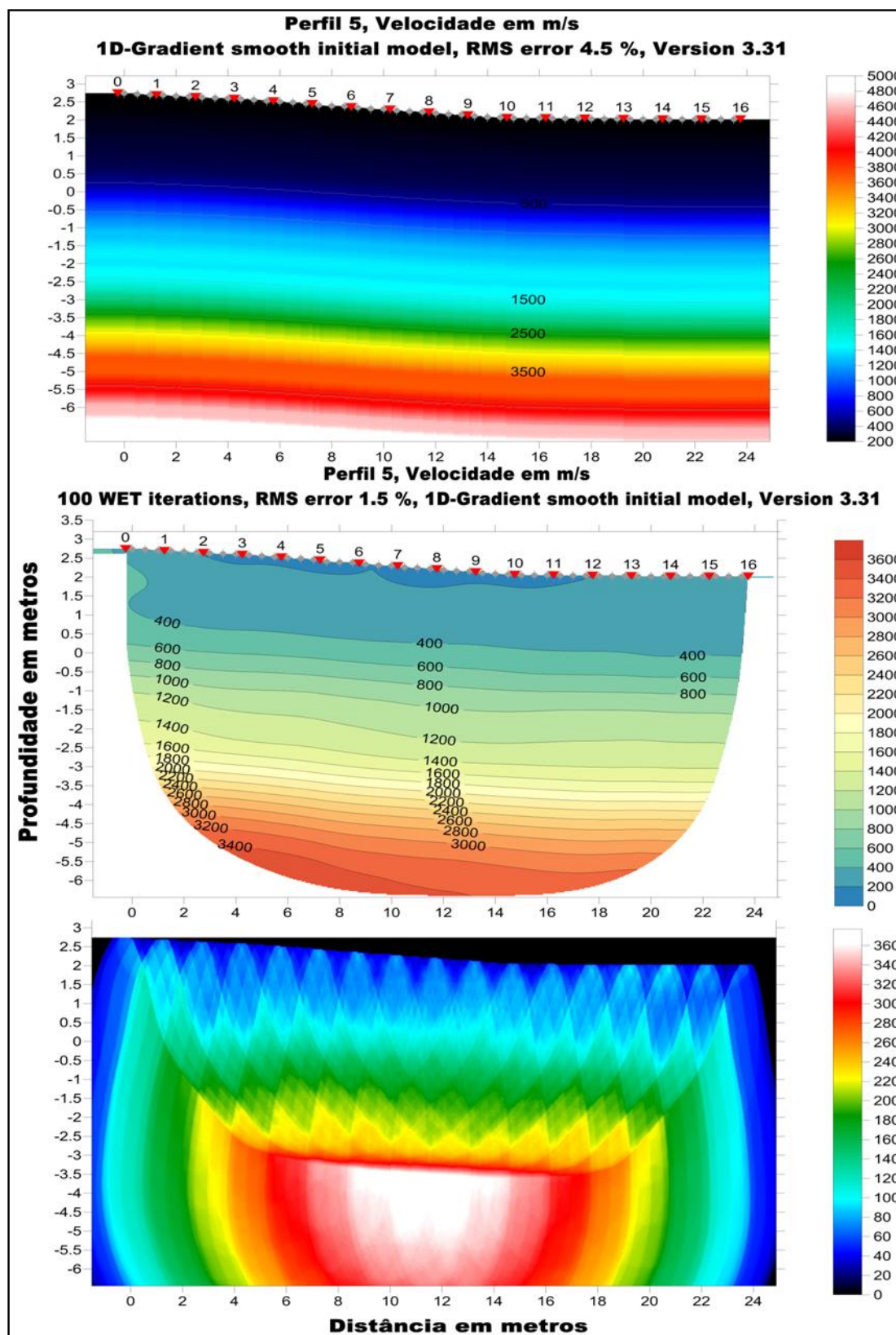


Figura 7.22. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 5 de sísmica

Perfil 6

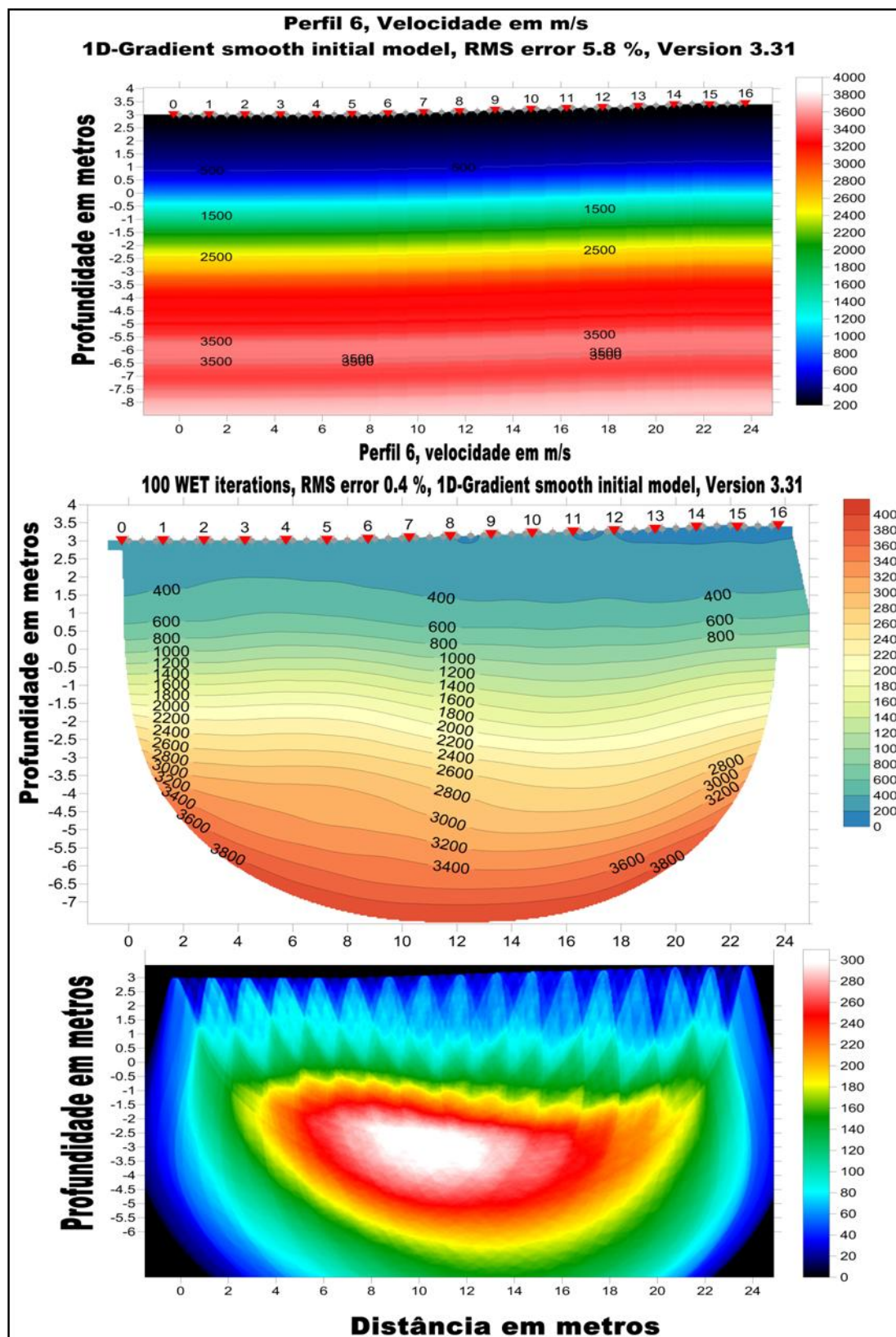


Figura 7.23. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 6 de sísmica

Perfil 7

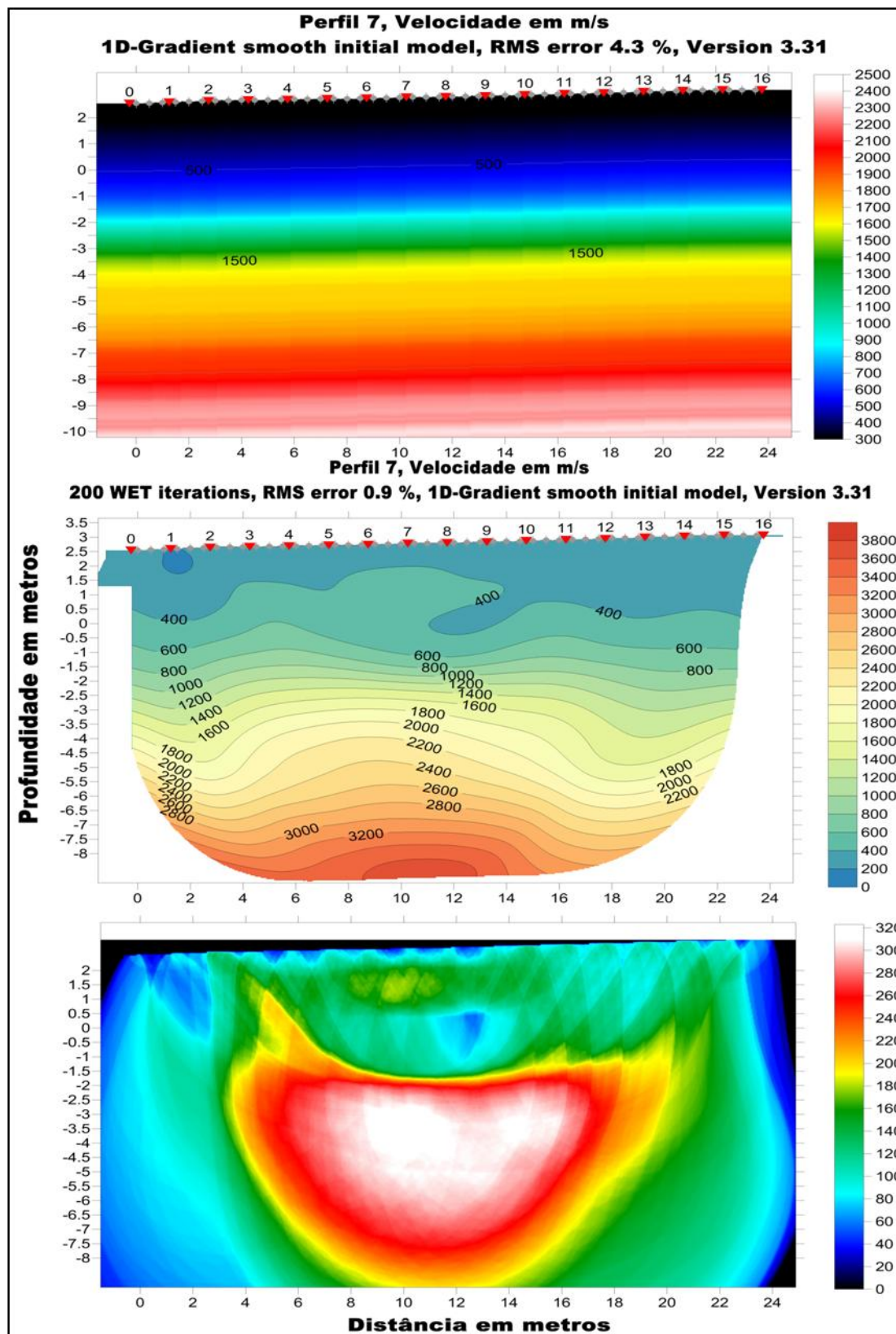


Figura 7.24. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 7 de sísmica

Perfil 8

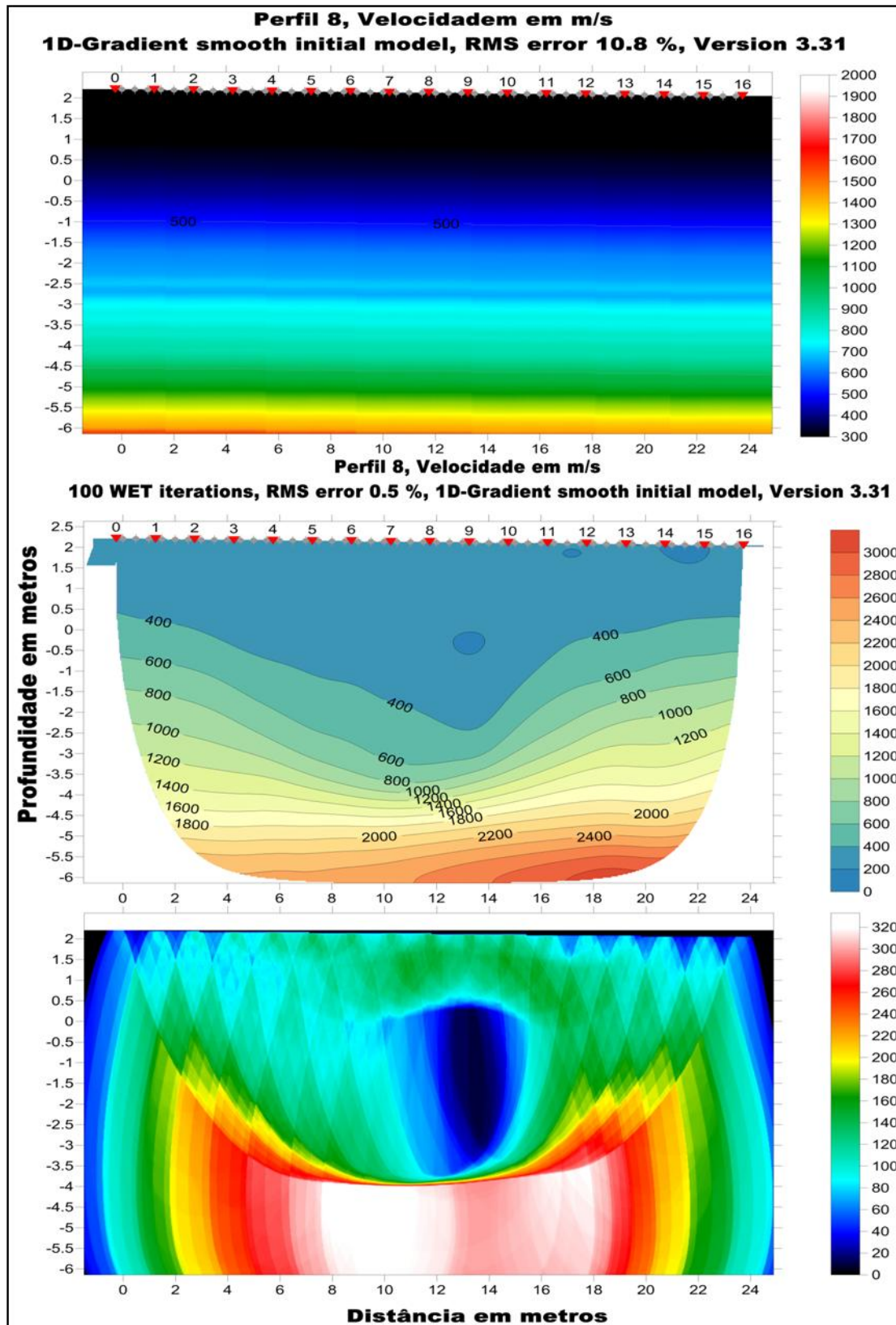


Figura 7.25. Modelo inicial, tomograma e cobertura de raios do perfil 8 de sísmica